

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ В ЧЕРНОГОЛОВКЕ  
НИЦ ТЕПЛОФИЗИКИ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ  
ТОМСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
ТОМСКИЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

---

Е. И. Азаркевич, А. Н. Диденко, А. Г. Жерлицын,  
Ю. В. Карпушин, А. А. Леонтьев, Г. В. Мельников, В. Б. Минцев,  
А. Е. Ушнурцев, В. Е. Фортов, В. И. Цветков, В. Б. Шнейдер,  
Б. К. Ясельский

94-4101

ПОЛУЧЕНИЕ ИМПУЛЬСОВ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ  
С ПОМОЩЬЮ ЭНЕРГИИ ХИМИЧЕСКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ  
ВЕЩЕСТВ

(Препринт)

*Generation of High  
Power Microwave Radiation  
with the Aid of High  
Explosive (PREPRINT)*

V. MINTSEV

20010926 143

Черноголовка 1992

## А Н Н О Т А Ц И Я

Приведены экспериментальные исследования принципов генерации мощного импульсного СВЧ-излучения с помощью энергии химических взрывчатых веществ. В качестве источника электронного пучка и СВЧ-генератора выбран вилокатор на основе триода с виртуальным катодом. Для преобразования энергии взрыва в электромагнитную разработаны высоковольтные спиральные взрывомангнитные генераторы с перехватом магнитного потока двух типов: цилиндрические с осевым инициированием и компактные конические генераторы со скользящим контактом, позволяющие получить в индуктивной нагрузке за время 7-10 нс энергию в несколько килоджоулей. Согласование импедансов взрывомангнитных генераторов и вилокатора, а также формирование необходимой формы электрического импульса осуществлялось с помощью электровзрывных прерывателей тока, обостряющих разрядника и емкости. Предложены модели работы взрывомангнитных генераторов и электровзрывных прерывателей, проведено численное моделирование переходных процессов в электрической цепи. В экспериментах к вилокатору подведены импульсы напряжения до 600 кВ с крутизной переднего фронта ~60 нс, при этом амплитуда тока в триоде достигала 16 кА. Пиковая мощность выведенного в атмосферу СВЧ-излучения составила не менее 100 МВт, а мощность в электронном пучке - 10 ГВт.

## A B S T R A C T

The experiments have been carried out to produce high power electron beam and microwave radiation with high explosive converted. The triode with virtual cathode was used in experiments under consideration. In order to convert the chemical energy of high explosive into the electrical one, two types of high voltage helical magnetic cumulative generators with flux trapping were designed: the cylindrical generators with simultaneous axial initiation of high explosive and the small-sized conical generators with sliding contact point. These generators have been producing the energy  $E \sim 10$  kJ in the load. To match the impedances of the viroator and a magnetic cumulative generator, and to shape the necessary electrical impulse in the load circuit, exploding wires, gas-filled gap and sharpening capacitor have been used. The electric technic models of the magnetic cumulative generators and exploding wires have been proposed, and digital simulation of the transitional processes in the electric circuit has been carried out. In the experiments considered voltage impulses up to 600 kV and currents up to 16 kA have been supplied to the viroator, the voltage rise time being ~60 ns. A peak microwave radiation power brought out has come nothing less than 100 MW, with an electron beam power reached 10 GW.

## СОДЕРЖАНИЕ

I. Введение.....	3
II. Описание электрической цепи и оценки ее параметров.....	5
2.1. Электрическая схема цепи.....	5
2.2. Переключение индуктивного накопителя на омическую нагрузку.....	9
2.3. Переключение индуктивного накопителя на вакуумный диод.....	10
2.4. Оценки параметров ВВП.....	14
2.5. Требования к электрическим параметрам, вырабатываемым ВВП.....	17
III. Модели работы ВВП с "перехватом" магнитного потока.....	17
3.1. Электротехническая модель работы ВВП с "перехватом" потока.....	19
3.2. Цепь без потерь.....	21
3.3. Влияние емкости в цепи запитки на параметры импульсов.....	23
3.4. Модель ВВП с осевым инициированием.....	25
3.5. Модель ВВП со скользящим контактом.....	30
3.6. Замечания к выбору оптимального закона изменения индуктивности.....	36
IV. Математическое моделирование процессов в электрической цепи.....	39
4.1. Электрическая схема замещения.....	39
4.2. ВВП.....	39
4.3. Виркатор.....	40
4.4. Обостряющий разрядник.....	40
4.5. Электровзрывной прерыватель тока.....	40
4.6. Система уравнений электрической цепи.....	46
4.7. Программа расчета режимов электрической цепи.....	47
V. Описание экспериментального стенда.....	49
5.1. Состав стенда.....	49
5.2. Система измерений.....	57
VI. Экспериментальное исследование работы ВВП с "перехватом" потока на индуктивную нагрузку.....	59
6.1. ВВП с осевым инициированием.....	59
6.2. Цилиндрические генераторы со скользящей точкой контакта.....	65
6.3. Конические генераторы.....	71
VII. Экспериментальное исследование режимов генерации мощного СВЧ-излучения.....	78
7.1. Схема 1.....	78
7.2. Схема 2.....	81
7.3. Схема 3.....	81
7.4. Схема 4.....	83
VIII. Обсуждение результатов и выводы.....	87
ЛИТЕРАТУРА.....	91

## I. Введение

Современный прогресс в разработке мощных импульсных генераторов когерентных колебаний микроволнового диапазона сделал возможным получение в лабораторных условиях интенсивных потоков СВЧ-излучения гигаваттного уровня мощностей при характерной энергии импульса в сотни джоулей [1-31]. Это открывает интересные перспективы использования таких потоков для направленного воздействия на конденсированные материалы и ионосферную плазму, для нагрева плазмы в термоядерных установках, для передачи электроэнергии из космоса на Землю, в радиолокации и связи, для функционального воздействия на клетки живого организма и т.п. Успешное решение этих задач связано с дальнейшим продвижением по шкале мощностей и энергий излучения, но уже сейчас это лимитируется возможностями системы электропитания СВЧ-генераторов, в качестве которых обычно используются емкостные накопители, являющиеся сложными, громоздкими и дорогостоящими инженерными сооружениями. В мегаджоульном диапазоне энергий реальной альтернативой емкостным накопителям являются взрывоманитные генераторы (ВМГ) [4,5], использующие химическую энергию конденсированных взрывчатых веществ (КВВ), которые имеют на 5-6 порядков более высокую плотность запасенной энергии. При этом, однако, возникает ряд нетривиальных проблем, вызванных несоответствием масштаба характерных энергий. Дело в том, что типичный уровень удельных энерговыделений при детонации КВВ соответствует энергии связи валентных электронов и составляет величину порядка электронвольта, в то время как эффективное преобразование энергии электронного пучка в электромагнитное излучение осуществляется в релятивистском диапазоне  $\hbar\omega \sim 0,5 \text{ МэВ}$ .

В данной работе для генерации интенсивного когерентного СВЧ-излучения использовались взрывоманитные генераторы, действие которых основано на магнитной кумуляции при взрывном сжатии оболочки с магнитным потоком продуктами детонации химического ВВ. Эти устройства характеризуются высокой плотностью генерируемой энергии  $\sim 10^8 \text{ Дж/м}^3$ , удельной мощностью

$\sim 10^{13}$  Вт/м<sup>3</sup> с эффективностью использования химической энергии КВВ до 10% [6,7].

Источником когерентного СВЧ-излучения выбран сильнотоочный релятивистский генератор - виркатор на основе триода с виртуальным катодом [1], в котором энергия интенсивного релятивистского электронного пучка с К.П.Д. до 30-40% преобразуется в энергию электромагнитного поля при осцилляторном движении электронов в потенциальной яме, создаваемой реальным и виртуальным катодами. Механизмом формирования интенсивного электронного пучка является взрывная эмиссия [8], обеспечивающая на "холодных" катодах значительные (до  $10^6$  А/см<sup>2</sup>) плотности тока и требующая поэтому для своей реализации токов питания генератора в единицы или десятки килоампер. Важно, что при этом в виркаторе удается сформировать электронные потоки, интенсивность которых значительно превосходит предельный вакуумный ток, без громоздкой системы создания внешнего фокусирующего магнитного поля, и обеспечить рекордно высокие (до 20 ГВт [9]) мощности СВЧ-излучения при крайней простоте генерирующего устройства. Кроме того, в виркаторных системах удается регулировать частоту излучения от 0,5 ГГц до 30 ГГц, формировать диаграмму направленности излучения в телесном угле  $\sim 20^\circ$ , а также получать СВЧ-импульсы микросекундной длительности [10].

Вместе с тем, физические особенности генерации СВЧ-излучения в триоде предъявляют жесткие требования системе электропитания, которая должна обеспечить импульсы напряжения  $\geq 300$  кВ с резким ( $< 10^{-7}$  сек) фронтом нарастания и импульсы тока  $> 10$  кА. С этой целью были разработаны специальные высоковольтные взрывомагнитные генераторы [11,12] спиральной конструкции с осевым инициированием заряда КВВ и малогабаритные генераторы со скользящим контактом. От других ВМГ их отличает способность реализовать импульсы напряжения  $\sim 100-200$  кВ непосредственно на генераторе при небольшом количестве КВВ  $\sim 150-600$  г за счет быстрого ( $\sim 5-15$  мкс) изменения большой начальной индуктивности генератора. Конструкция генератора обеспечивает на согласованной нагрузке электрические импульсы энергией  $\sim 50$  кДж и мощностью  $\sim 10$  ГВт.

В первых экспериментах [11] по взрывной генерации СВЧ-излучения для формирования электрического импульса  $\sim 350$  кВ и согласования импедансов ВМГ и виристора использовались повышающий импульсный трансформатор с коэффициентом трансформации  $\sim 4$  и обостряющий газонаполненный разрядник. Зарегистрированная мощность излучения ( $\sim 10^6$  Вт) ограничивалась недостаточной скоростью нарастания электрического импульса. Переключение анод-катодного промежутка ионной плазмой наступало раньше момента достижения критических для мощной генерации электронных токов. Введение во вторичную цепь обостряющей емкости  $\sim 1 \cdot 30$  нФ позволило повысить мощность излучения до  $10^6$  Вт при длительности  $\sim 700$  нс.

Анализ проведенных ранее экспериментов показал, что для создания на виристоре электрических импульсов требуемой крутизны нарастания, амплитуды и длительности необходимо использовать электровзрывной прерыватель (ЭВП). В этом случае оказывается возможным работа СВЧ-генератора с низким уровнем энергий в индуктивном накопителе (несколько килоджоулей). Кроме того, в схеме питания отсутствует такой сложный элемент, как высоковольтный трансформатор.

Настоящая работа посвящена исследованию режимов генерации СВЧ-импульса, выбору конкретных устройств и их параметров для предложенной нами безтрансформаторной схемы питания виристора.

## II. Описание электрической цепи и оценка ее параметров.

### 2.1. Электрическая схема цепи.

Принципиальная схема электрической цепи, предлагаемая для запитки виристора, приведена на рис. 2.1.1. Здесь ИТ — источник тока запитки. Это может быть емкостной источник энергии, аккумуляторная батарея или зарядный ВМГ, использующий первоначальную энергию постоянных магнитов, пьезо-керамики, феррокерамики. ВМГ2 с "парахватор" магнитного потока предназначен для выработки во вторичной цепи электрического импульса с заданными параметрами. ВМГ представляет

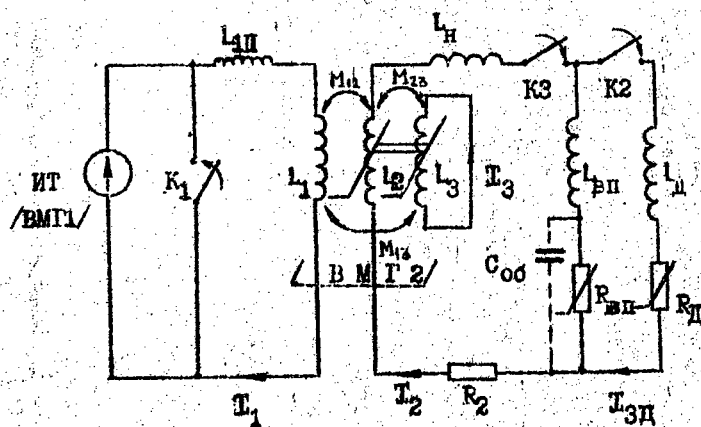


Рис. 2.1.1. Электрическая схема цепи для запитки триона.

тремя индуктивно связанными соленоидами: спиралями  $L_1$ ,  $L_2$  и лайнером  $L_3$ . Индуктивность  $L_{12}$  - паразитная индуктивность первичной цепи ВМГ. Электровзрывной прерыватель тока ( $R_{вп} - L_{вп}$ ), обмотка  $L_2$  и индуктивный накопитель  $L_n$  образуют вторичную цепь. Элементы  $R_d$  и  $L_d$  моделируют виркатор - не- линейную полезную нагрузку. Ключи  $K_1$  и  $K_3$  - замыкатели ВМГ,  $K_2$  - обостряющий разрядник,  $C_{об}$  - обостряющая емкость с индуктивностью  $L_{об}$  (не показана).

В момент достижения максимума тока запитки происходит подрыв заряда КВВ. Ключи  $K_1$  и  $K_3$  замыкаются, ВМГ начинает работать. Движение лайнера приводит к изменению индуктивностей  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  и их взаимоиндуктивностей. Во вторичной цепи генерируется электрический ток, а на накопительной индуктивности появляется напряжение. Параметры ЭВИ подбираются таким образом, чтобы взрыв проводки происходил при максимуме тока во вторичной цепи. При взрыве ЭВИ происходит резкий подбор напряжения, разрядник  $K_2$  пробивается и ток переключается в триод (виркатор).

Математическое моделирование процессов в электрической цепи рассмотрим в последующих главах. В этой главе остановимся на оценке параметров этой цепи с целью выяснения требований, предъявляемых к электрическим параметрам, вырабатываемым ВМГ.

Главным критерием здесь является получение мощности СВЧ излучения на уровне 1 ГВт. В настоящее время отсутствует хорошая модель с обратной связью, которая описывала бы зависимость параметров СВЧ-излучения от электрического импульса в триоде, поэтому будем ориентироваться на экспериментальные данные [1], в соответствии с которыми для 1 ГВт СВЧ требуется напряжение на триоде  $\sim 300-500$  кВ, ток  $> 10$  кА, фронт нарастания импульса  $\tau_f < 100$  нс и длительность импульса  $\tau \sim 0,5-1$  мкс.



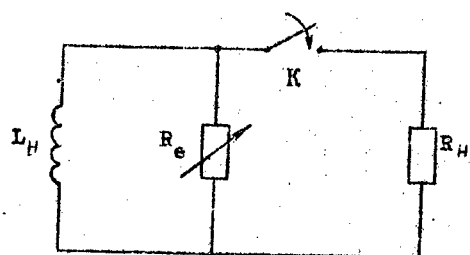


Рис.2.2.1. Эквивалентная схема подключения омической нагрузки.

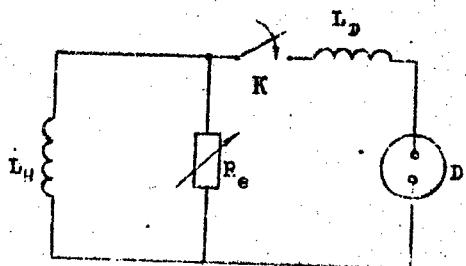


Рис.2.3.1. Эквивалентная схема подключения диода.

## 2.2. Переключение индуктивного накопителя на омическую нагрузку

Для проведения оценок рассмотрим конечную стадию работы схемы рис.2.1.1. В связи с тем, что процесс электро-взрыва проволок происходит достаточно быстро ( $\sim 50-100$  нсек) по сравнению со временем работы ВМГ ( $\sim 5-10$  мксек), в первом приближении рассмотрим упрощенную схему на рис.2.2.1. Пусть в начальный момент  $t=0$  в постоянной индуктивности  $L_H$  накоплена энергия  $E = I_H I_0^2 / 2$ , где  $I_0$  — начальный ток в левом контуре цепи. Электросопротивлению ЗЭП начинает быстро расти от начального значения  $R_{e0}$ , соответствующего значению начала электровзрыва проводников. Согласно (14), на стадии электровзрыва сопротивление можно аппроксимировать простым законом  $R_e = R_{e0} e^{\beta t}$ , где величина параметра  $\beta = 10^7$  сек $^{-1}$  зависит от скорости вклада энергии. Положим также, что в начальный момент ключ  $K$  замыкается, подключая нагрузку, которую для простоты заменим активным сопротивлением  $R_H$ .

В этом случае цепь описывается системой дифференциальных уравнений:

$$L_H \frac{dI_1}{dt} + R_e I_2 = 0$$

$$R_e I_2 = R_H I_3$$

$$I_1 = I_2 + I_3,$$

решение которой:

$$I_1 = I_0 \left( \frac{R_H + R_{e0}}{R_H + R_e} \right)^{R_H / \beta L_H}$$

При этом на нагрузке развивается напряжение

$$U_H = \frac{R_e R_H}{R_e + R_H} I_0 \left( \frac{R_H + R_{e0}}{R_H + R_e} \right)^{R_H / \beta L_H}$$

максимальное значение которого

$$U_{H\max} = R_H I_{10} \beta L_H \frac{(R_H + R_{eo}) R_H / \beta L_H}{(R_H + R_{eo}) (1 + R_H / \beta L_H)} \quad 2.2.1$$

достигается в момент времени

$$t_{\max} = \frac{1}{\beta} \ln \frac{\beta L_H}{R_{eo}} \quad 2.2.2$$

Подставив характерные величины  $\beta = 5 \cdot 10^7$  сек $^{-1}$ ,  $L_H \approx 5 \cdot 10^{-6}$ ,  $R_{eo} \approx 2,5$  см,  $R_H \approx 40$  ом, получим, что при токе  $I_{10} \approx 15$  кА в нагрузке можно получить напряжение  $U_{H\max} \approx 500$  кВ со временем достижения максимума  $t_{\max} \approx 100$  нс.

Для получения максимального напряжения в нагрузке важное значение имеет выбор величины индуктивности накопителя. Как показывают имеющиеся экспериментальные данные, габариты ВМГ определяются в основном его способностью вырабатывать заданную энергию, поэтому зафиксируем начальную энергию в индуктивном накопителе и максимизируем значение  $U_{H\max}$  относительно величины индуктивности  $L_H$ . Найдём

$$L_{H\text{опт}} \approx 2,5 \frac{R_H}{\beta} \quad 2.2.3$$

Для характерных значений величин  $L_H \approx 2$  мкГн, при этом для получения в нагрузке напряжения  $\sim 500$  кВ достаточно первоначальная энергия  $E_0 \approx 300$  Дж.

Таким образом, использование простых аналитических формул 2.2.1-2.2.3 позволяет оценить основные параметры электрического импульса в реальной нагрузке, используя эквивалентное ей омическое сопротивление, а также выбрать величину индуктивной нагрузки и первоначальный запас энергии.

### 2.3. Переключение индуктивного накопителя на вакуумный диод

С электротехнической точки зрения вакуумный диод представляет собой переменное сопротивление, уменьшающееся со

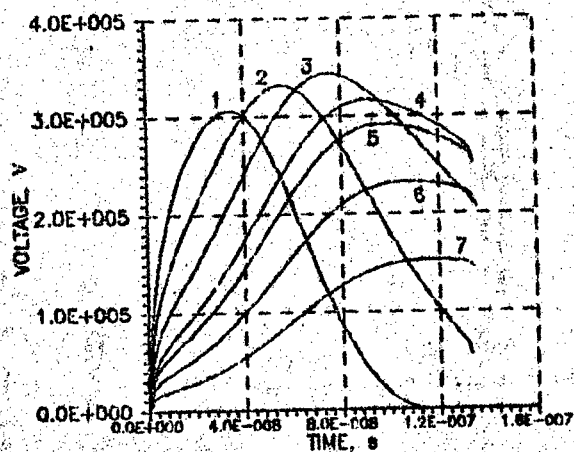


Рис. 2.3.2. Расчетные формы импульсов напряжения в диоде для различных величин индуктивности нагрузки:

1 - 0.4 мкГн, 2 - 1.0 мкГн, 3 - 2.0 мкГн,  
4 - 4.0 мкГн, 5 - 10 мкГн, 6 - 30 мкГн,  
7 - 40 мкГн

временем. Это вольт-амперная характеристика описывается законом Чайльд-Ленгмюра :

$$I_d = \frac{P U_d^{3/2}}{(1 - v_m t / d_k)^2} \quad \text{или} \quad U_d = A(t) I_d^{2/3}$$

Здесь  $P_0$  - начальный пореанс диода,  
 $d_k$  - расстояние между анодом и катодом,  
 уменьшающееся со временем,  
 $v_m$  - скорость движения фронта плазмы.

Наличие существенного нелинейного элемента в цепи значительно изменяет проведение в предыдущем параграфе оценки, поэтому были проведены расчеты импульсов напряжения, генерируемых в диоде при его включении на него с помощью ЭВИ индуктивного накопителя, по схеме, приведенной на рис.2.3.1. Эта цепь описывается уравнениями:

$$I_H \frac{dI_1}{dt} + I_d \frac{dI_3}{dt} + A(t) I_3^{2/3} = 0$$

$$I_H \frac{dI_1}{dt} + R_e I_2 = 0$$

$$I_1 = I_2 + I_3$$

Численное интегрирование этой системы уравнений было проведено для  $\beta = 3.8 \cdot 10^7 \text{ сек}^{-1}$ . На рис. 2.3.2. приведены расчетные формы импульсов напряжения в диоде для различных величин индуктивностей нагрузки при фиксированной величине первоначально запасенной энергии  $E_0 = 450 \text{ Дж}$ . Видно наличие оптимальной величины индуктивности  $\approx 2+3 \text{ мГн}$ , когда достигаются максимальные напряжения. Уменьшение индуктивности нагрузки приводит к значительному сокращению длительности импульса, что весьма нежелательно. На рис. 2.3.3. приведены максимальные значения напряжения на диоде в зависимости от величины нагрузочной индуктивности для трех фиксированных значений энергии. Видно, что при увеличении энергии оптимальные вели-

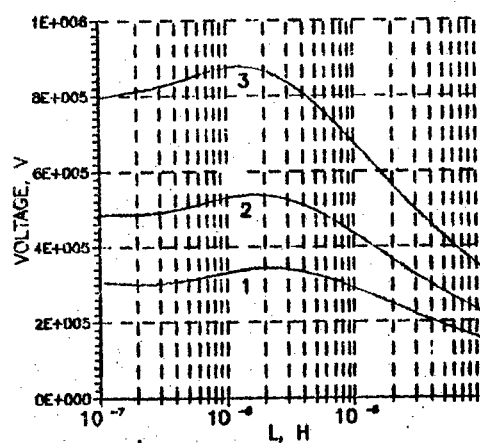


Рис. 2.3.3. Расчетные зависимости  
максимального напряжения  
в диоде от величины индук-  
тивности нагрузки при раз-  
личных энергиях:  
1 - 450 Дж, 2 - 1.0 кДж, 3 - 4.5 кДж

чивы индуктивности значительно уменьшаются, что связано с уменьшением эквивалентного сопротивления диода. Для достижения мегавольтного уровня напряжений необходима энергия в индуктивном накопителе  $\sim 5$  кДж, а для реализации напряжения  $\sim 500$  кВ достаточно  $E_0 \sim 1$  кДж, что соответствует току  $I_0 \sim 30$  кА в нагрузке  $I_H = 2 \cdot 10^{-6}$  А.

#### 2.4. Оценка параметров ЭВП.

Проведенные в предыдущем параграфе оценки позволяют определить величину запасенной в индуктивном накопителе энергии и оптимальные значения его индуктивности. При этом предполагалось, что прерыватель прерывателя достигает стадии собственно взрыва в момент максимума тока защиты от ВМГ. В этом параграфе сделаем оценки параметров ЭВП и выясним требования к импульсу защитного тока. Для этого воспользуемся приближенной моделью электровзрыва [13], в которой весь процесс делится на две стадии: стадию нагрева и стадию собственно взрыва.

Стадия нагрева включает нагрев твердого металла, плавление и нагрев жидкого металла до начальной точки взрыва. Удельное сопротивление материала  $\rho = RS/l$  на этой стадии представляется в виде кусочно-линейной функции удельной введенной энергии  $w = W/Sl$ , где  $S$  - начальное сечение проводника,  $l$  - его длина. Параметры этой зависимости приведены в п. 3.5.

На стадии взрыва происходит взрывное вскипание перегретого металла и резкий рост сопротивления, который можно считать экспоненциальным во времени. Инкремент нарастания сопротивления  $\beta$  зависит от диаметра проволоки и скорости ввода энергии:

$$\beta = \frac{V_0}{d} \cdot \exp \left( - \frac{B_1}{J_b^2 d} \right),$$

где  $d$  - диаметр проволоки,  $J_b$  - плотность тока в начальной точке стадии взрыва,  $V_0$  и  $B_1$  - параметры модели, постоянные

для данного металла и окружающей среды. Величину  $V_c$  можно рассматривать как, некую продольную "скорость волны потери проводимости" при электровзрыве. Численные значения этих параметров для медных проволок, взрывающихся в воздухе:  $V_c = 2.44 \cdot 10^3$  м/с,  $V_1 = 2.4 \cdot 10^{18}$  А<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Для оценки необходимого количества проволок служит соотношение "интеграла действия":

$$\int_0^{t_b} I^2 dt = S^2 h,$$

где  $I = I(t)$  — ток ЭВП,  $t_b$  — "момент взрыва",  $S = \frac{\pi d^2}{4}$  — общее сечение ЭВП,  $h$  — "удельное действие". Величина  $h$  слабо зависит от плотности тока и в интересующем нас диапазоне можно принять для медных проволок в газе, что

$$h = (1.8 \pm 0.1) \cdot 10^{17} \text{ А}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^4.$$

При использовании этой формулы наибольшие затруднения вызывает определение тока, так как обычно известны параметры электрического импульса в отсутствие ЭВП. Как показывают имеющиеся экспериментальные данные, наличие ЭВП значительно уменьшает амплитуду максимального тока в цепи  $I_m \approx (0.7 + 0.8) \cdot I_{m0}$ . Оценку интеграла можно проводить по формуле  $\int_0^{t_b} I^2 dt = k I_m^2 t_b$ , где  $k$  — множитель, зависящий от формы импульса тока: если она близка к четверти периода синусоиды, то  $k = 0.5$ , если близка к треугольной, то  $k = 0.33$ .

Для определения необходимой длины проволок можно использовать зависимость, связывающую пробивное напряжение ЭВП со скоростью ввода энергии:

$$\frac{U_n \sqrt{l}}{1} = A \exp \left( - \frac{B_2}{J_b^2 l} \right)$$

где  $l$  — длина проволок,  $U_n$  — пробивное напряжение,  $J_b$  — плотность тока в начальной точке взрыва,  $A$  и  $B$  — эмпирически определенные константы  $A \approx (10 \pm 2) \cdot 10^3$  В/м<sup>1/2</sup>,  $B_2 = 2.2 \cdot 10^{18}$ .



$A^2/M^3$ . Величина  $A$  зависит от величины подключаемой нагрузки: растет с ростом ее сопротивления. Наиболее неопределенная величина в этой формуле —  $J_b$ . Можно принять  $J_b = (0,8+1,0)J_m$ , где  $J_m = I_m/S$ .

Как видно из выражения для инкремента, он уменьшается с уменьшением плотности тока или с увеличением времени протекания тока по проводникам. Для получения достаточно больших значений  $\beta \geq 10^7 \text{ с}^{-1}$  время протекания тока не должно превышать  $t_b \leq 10 \text{ мкс}$ . Чтобы показать это, примем для простоты, что  $J_b = J_m$ , тогда  $k J_b^2 t_b = h$ . Выразим отсюда  $J_b^2$ , подставим в выражение для инкремента и умножим его части на  $t_b$ :

$$\beta t_b = \frac{V_0 t_b}{d} \cdot \exp \left[ - \frac{B_1 k t_b}{h d} \right]$$

Правая часть этого равенства как функция  $t_b/d$  имеет максимум, когда выражение в скобках равно  $-1$ . Поэтому левая часть тоже ограничена:

$$\beta t_b \leq \frac{V_0 h}{B_1 k}$$

Полагая  $k=0,5$  и подставив приведенные выше значения параметров, получим:

$$\beta t_b \leq 10^7.$$

Тогда, например, для  $\beta = 2 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ , надо иметь  $t_b \leq 6,5 \text{ мкс}$ . При заданном времени протекания тока существует оптимальный диаметр проводника, для которого инкремент максимален:

$$d_{\text{опт}} = \frac{B_1 k t_b}{h}$$

Этих формул достаточно для оценки параметров прерывателя. Если ток  $I=30 \text{ кА}$  достигается за  $7 \text{ мксек}$ , а форма его импульса близка к треугольной, то необходимо взять  $N=50$  шт проволок диаметром  $d=0,05 \text{ мм}$  и длиной  $l=600+800 \text{ мм}$ .

Оценить энергию, необходимую для электрозвиза проводни-

ков, можно исходя из того, что при оптимальном их диаметре энергия, потребляемая при взрыве, примерно равна энергии связи  $E_{\text{ЭВ}} \approx 50 \text{ Дж/мм}^3 [14]$ . В нашем примере полная энергия, потребляемая прерывателем, составляет  $E \approx 3 \text{ кДж}$ .

## 2.5. Требования к электрическим параметрам, вырабатываемым ВМГ

Приведенные в предыдущих параграфах оценки позволяют сформулировать требования к электрическим параметрам, вырабатываемым ВМГ, для обеспечения на диоде по выбранной схеме необходимых условий для генерации СВЧ излучения  $U \approx 30 \text{ кВ}$ ,  $I > 10 \text{ кА}$ ,  $\tau_{\text{д}} < 100 \text{ нс}$ ,  $\tau \approx 0,5 \text{ мксек}$ . Для этого ВМГ должен вырабатывать на индуктивной нагрузке в несколько микрогнри энергию  $\geq 1 \text{ кДж}$  за время  $t \leq 10 \text{ мксек}$ . При подключении в цепь с ЭВП ВМГ, последний должен обеспечить дополнительную энергию  $\approx 3 \text{ кДж}$  для электровзрыва проводников. Разработанные для этих целей конструкции ВМГ и принципы их действия рассмотрены в следующих главах.

## III. Модели работы ВМГ с "печехватом" магнитного потока.

В настоящее время физика процессов магнитной кумуляции, которая лежит в основе принципа действия ВМГ, развита достаточно хорошо. Первые работы в этой области относятся к началу 50-х годов [6,7]. Уже разработано большое количество конструкций ВМГ, которые в основном предназначены для генерации сверхсильных магнитных полей (до 2500 Тл) и реализации различных уровней энергии электрического импульса (до 100 МДж). Однако в большинстве опубликованных экспериментов ВМГ использовались для запитки малоиндуктивных нагрузок  $\sim 1 \text{ мГн}$  с характерным временем  $\sim 100 \text{ мкс}$ . При таких величинах индуктивностей нагрузки был хороший коэффициент преобразования энергии, поскольку эффективность передачи энергии КВВ в электрическую пропорциональна коэффициенту перестройки цепи [15]. Интерес к исследованию возможности применения

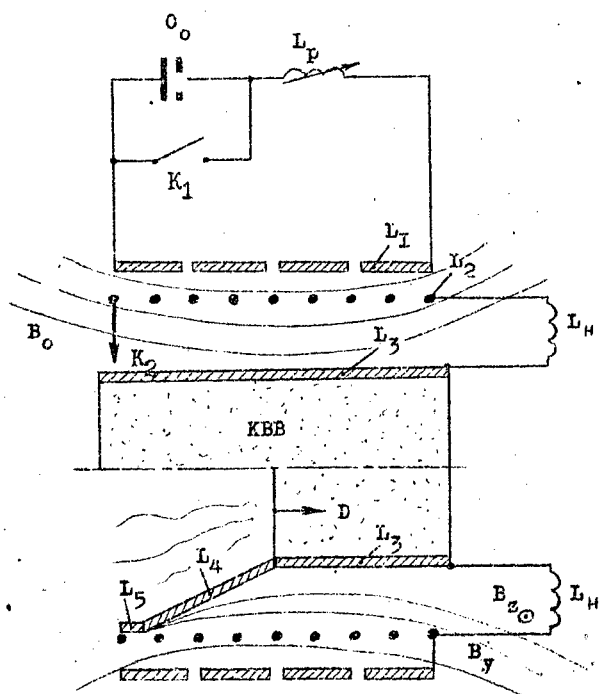


Рис.3.1.1. Схема ВМГ с "перехватом" потока.

ВМГ для запитки нетрадиционных высокоимпедансных нагрузок применялся лишь в последнее время в связи с разработкой источников питания для мощных СВЧ-излучателей [4,5], релаксатора [16], систем возбуждения лазеров [17] и других. В этих экспериментах использовались быстроходные ВМГ с характерным временем работы  $\sim 10$  нс, однако их индуктивность была небольшой ( $\leq 100$  нГн), так что для согласования с нагрузкой применялся дополнительный элемент — импульсный трансформатор. Анализ имеющихся литературных данных показал, что в настоящее время отсутствуют ВМГ с требуемыми для высокоимпедансных нагрузок параметрами. Это вызвало необходимость разработки таких ВМГ.

ВМГ с перехватом магнитного потока впервые предложены в [18,19]. В данной главе рассмотрены принципы работы ВМГ с перехватом потока и приведены конструкции ВМГ, удовлетворяющие требованиям запитки вириаторов. В главе 6 описаны экспериментальные исследования процессов генерации электрического импульса в высокоимпедансной нагрузке — вириаторе.

### 3.1. Электрическая модель работы ВМГ с перехватом потока

ВМГ с "перехватом" магнитного потока (рис.3.1.1) состоит из соосно расположенных внешнего запиточного соленоида  $L_1$ , внутреннего соленоида  $L_2$  и медного цилиндрического лайнера  $L_3$  с зарядом КВВ внутри. Начальный поток в соленоиде  $L_2$  создается при запитке от конденсаторной батареи  $C_0$  или другого ВМГ  $L_p$  на соленоид  $L_1$ . В момент достижения максимума тока инициируется заряд КВВ. Продукты детонации приводят в движение медный лайнер, который замыкает вторичную цепь, "перехватывая" магнитный поток, созданный внешним соленоидом. В случае осевого инициирования лайнер осесимметрично расширяется относительно продольной оси ВМГ в виде цилиндра, а при инициировании с торца — в виде конуса, который начинает последовательно замыкать витки спиралей  $L_2$ . В результате магнитный поток вытесняется в нагрузку  $L_H$ . Видно, что амплитуда импульса в  $L_H$  определяется лишь длиной расширения лайнера. Чтобы определить эффективность передачи энергии

в нагрузку, рассмотрим подробнее электротехническую модель работы ВМГ.

Для описания работы генератора требуется удачный выбор электротехнической модели и корректный расчет его индуктивности и сопротивления в зависимости от положения лайнера. Работу обычного спирального генератора представляют с помощью одноконтурной электрической схемы замещения, а индуктивность  $L_r$  вычисляют, разделяя генератор на  $N$  последовательных секций [20]. Каждая секция состоит из нескольких витков, тогда  $L_r$  будет:

$$L_r = \sum_{i=1}^N L_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M_{ij} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N N_{ij}$$

Здесь  $L_i$  — самоиндуктивности  $i$ -й секции спирали генератора,  $M_{ij}$  — взаимноиндуктивности  $i$ -й и  $j$ -й секции спирали ( $M_{ij}=0$  для  $i=j$ ),  $N_{ij}$  — взаимноиндуктивности  $i$ -й секции спирали и  $j$ -секции медного лайнера,  $i=1$  для начального момента  $t=0$ . В нашем случае, при наличии внешнего запиточного соленоида  $L_1$ , в формулу для  $L_r$  войдут члены самоиндуктивностей и взаимноиндуктивностей этого соленоида. При этом следует учитывать, что запиточный соленоид  $L_1$  остается целым (не разрушается продуктами детонации) до конца работы генератора.

Описанный метод вычисления  $L_r$  для получения зависимостей тока и напряжения в нагрузке от времени несложно реализовать на ЭЕМ. Для аналитических оценок конечных значений величины электрических импульсов, выдаваемых генератором, рассмотрим упрощенную модель генератора с внешним возбуждением.

Представим расширяющийся медный лайнер как соленоид с взаимной индуктивностью  $L_3$ . Тогда магнитные потоки, связанные с индуктивностями соленоидов  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$ , запишутся в виде

$$\Phi_1 = L_1 I_1 + \sum_j M_{1j} I_j \quad ; \quad 1, j = \{1, 2, 3\} \quad 3.1.1$$

Здесь  $I_1$  — амплитудный ток в 1-м соленоиде,

$$M_{1j} = k_{1j} \sqrt{L_1 L_j} \quad ; \quad i \neq j$$

$k_{1j}$  — коэффициент индуктивной связи 1-го и j-го соленоидов.  
В соответствии с законами Кирхгофа, для функций токов  $I_1(t)$  в такой трехконтурной модели с индуктивными связями имеем систему уравнений:

$$\begin{aligned} U_0 + \int_0^t \frac{I_1}{C_0} dt + \frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{d(L_p I_1)}{dt} + R_1 I_1 &= 0 \\ \frac{d\Phi_2}{dt} + L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_2 I_2 &= 0 \\ \frac{d\Phi_3}{dt} + R_3 I_3 &= 0 \end{aligned} \quad 3.1.2$$

Здесь  $R_1$  определяют потери магнитных потоков в соответствующих контурах,  $U_0$  — напряжение на конденсаторах при замыкании ключа БК (если замыкание проводится в момент максимума тока  $U_0=0$ ),  $L_p$  — паразитная индуктивность цепи запитки или остаточная индуктивность запиточного генератора. Полагаем, что первый контур остается замкнутым до окончания работы ВМГ. В момент времени  $t=0$  начальные условия определяются как  $I_1=I_{10}$ ;  $I_2=0$ ;  $\Phi_3=0$ . Последнее условие означает, что магнитный поток не проникает внутрь лайнера при запитке.

Для численного решения исходной системы уравнений необходимо задаться законом изменения индуктивностей и их взаимоиндуктивностей. К этому вопросу мы вернемся позже, а сначала рассмотрим ряд упрощенных решений.

### 3.2. Цепь без потерь

Если пренебречь потерями потока в контурах  $R_1=0$ , а емкость батареи конденсаторов считать достаточно большой  $C_0 \gg \tau^2/L_1$  ( $\tau$  — время работы генератора), система уравнений 3.1.1 легко интегрируется:

$$\Phi_1 + L_p I_1 = \Phi_{10} + L_p I_{10}$$

$$\Phi_2 + L_H I_2 = \Phi_{20} \quad 3.2.1$$

$$\Phi_3 = \Phi_{30}$$

Здесь  $\Phi_{10}$  — начальные магнитные потоки в контурах. После преобразований получим:

$$I_2 = \frac{(k_{120} - k_{130} k_{230}) \sqrt{L_1 L_{20}} I_{10}}{[L_H + L_2 (1 - k_{23}^2) - \frac{(k_{12} - k_{13} k_{23})^2}{1 - k_{13}^2 + L_p/L_1}]} \cdot \left[ 1 - \sqrt{L_2/L_{20}} \frac{(k_{12} - k_{13} k_{23}) [L_1 (1 - k_{130}^2) + L_p]}{(k_{120} - k_{130} k_{230}) [L_1 (1 - k_{13}^2) + L_p]} \right] \quad 3.2.2.$$

$$I_1 = \frac{[L_1 (1 - k_{130}^2) + L_p]}{[L_1 (1 - k_{13}^2) + L_p]} I_{10} - \frac{(k_{12} - k_{13} k_{23}) \sqrt{L_1 L_2}}{[L_1 (1 - k_{13}^2) + L_p]} I_2$$

Зная закон изменения  $L_2(t)$  и  $k_{1j}(t)$ , можно найти параметры электрического импульса в контурах в зависимости от времени.

Для генераторов со скользящим контактом в конце работы при  $t=t_k$   $L_2(t_k)=0$ ;  $k_{12}(t_k)=0$ ;  $k_{13}(t_k)=k_{13k}$ . Тогда для токов имеем следующие простые выражения:

$$I_{1k} = \frac{[L_1 (1 - k_{130}^2) + L_p]}{[L_1 (1 - k_{13k}^2) + L_p]} I_{10} \quad 3.2.3$$

$$I_{2k} = (k_{120} - k_{130} k_{230}) \frac{\sqrt{L_1 L_{20}}}{L_H} I_{10} \quad 3.2.4$$

Для систем с перехватом потока важное значение имеет коэффициент усиления магнитного потока  $\lambda$ . В последнем случае магнитный поток

$$\Phi_{2k} = I_H I_{2k}$$

превышает начальный магнитный поток

$$\Phi_{10} = I_T (1 - k_{130}^2) I_{10}$$

во внешнем соленоиде в  $\lambda$  раз

$$\lambda = \frac{\Phi_{2k}}{\Phi_{10}} = \frac{(k_{120} - k_{130} k_{230})}{(1 - k_{130}^2)} \sqrt{I_{20}/I_H} \quad 3.2.5$$

Таким образом, ВМГ с "перехватом" магнитного потока являются усилителями потока, что имеет важное значение при создании многокаскадных взрывных устройств.

Найдем коэффициент усиления энергии в идеальной системе с "перехватом" со скользящим контактом. В начальный момент в перемычной цепи запасена энергия

$E_{10} = I_T (1 - k_{130}^2) \frac{I_{10}^2}{2}$ , в конечный момент в нагрузке имеем  $E_{2k} = I_H \frac{I_{2k}^2}{2}$ , тогда

$$\Phi_E = \frac{E_{2k}}{E_{10}} = \frac{(k_{120} - k_{130} k_{230})^2}{(1 - k_{130}^2)} \frac{L_{20}}{L_H} \quad 3.2.6$$

### 3.3. Влияние емкости в цепи запитки на параметры импульсов

Для отладки ВМГ с перехватом потока технически удобно запитывать внешний соленоид от емкостного накопителя, и не закорачивать его после запитки. При этом возникает вопрос о правомочности применения полученных формул на конкретные многокаскадные системы. Чтобы точнее оценить влияние накопи-



теля, рассмотрим простейшую модель предыдущего параграфа с емкостью в цепи запитки. Преобразуя систему 3.1.2, получим

$$\frac{1}{\sigma_0} \int_0^t I_1 dt^2 + [L_p + L_1 (1 - k_{13}^2 - \frac{(k_{12} - k_{13}k_{23})^2 L_2}{L_2(1 - k_{23}^2) + L_H})] I_1 = \quad 3.3.1$$

$$= [L_p + L_1 (1 - k_{130}^2 - \frac{(k_{120} - k_{130}k_{230})(k_{12} - k_{13}k_{23}) \sqrt{L_2 L_{20}}}{[L_2(1 - k_{23}^2) + L_H]})] \cdot I_{10}$$

$$I_2 = \frac{(k_{120} - k_{130}k_{230}) \sqrt{L_1 L_{20}} I_{10} - (k_{12} - k_{13}k_{23}) \sqrt{L_1 L_2} I_1}{L_2(1 - k_{23}^2) + L_H} \quad 3.3.2$$

Для дальнейших оценок положим, что индуктивность внутреннего соленоида убывает линейно со временем  $L_2 = L_{20}(1 - x)$ :  $x = t/\tau$ , а коэффициент связи

$$k_{12} = k_{120} \sqrt{1 - x}.$$

Линейер разобьем на две части с коэффициентами связи

$$k_{13} = k_{130} \sqrt{1 - x}, \quad k_{23} = k_{230}, \quad k_{14} = k_{140} \sqrt{x}, \quad k_{24} = 0.$$

Тогда при  $L_{20} \gg L_H$  для уравнения 3.3.1 получим

$$\frac{1}{\sigma_0} \int_0^t I_1 dt^2 + L_1 (a - b \frac{t}{\tau}) I_1 = a L_1 I_{10} \quad 3.3.3$$

с начальным условием при  $t=0$ :  $I_1 = I_{10}$ ,  $\frac{dI_1}{dt} = \frac{b}{a\tau} I_{10}$

$$\text{где } a = 1 + L_p/L_1 - k_{130}^2 - \frac{(k_{120} - k_{130}k_{230})^2}{(1 - k_{230}^2)};$$

$$b \approx k_{14k}^2 - k_{130}^2 - \frac{(k_{120} - k_{130} k_{230})^2}{(1 - k_{230}^2)}$$

Решение уравнения (3.3.3)

$$I_1 = I_{10} \frac{z_0 [Y_0(z_0) J_1(z) - J_0(z_0) Y_1(z)]}{z [Y_0(z_0) J_1(z_0) - J_0(z_0) Y_1(z_0)]} \quad 3.3.4$$

где  $z = 2\sqrt{\alpha(1 - \frac{bt}{at})}$ ,  $\alpha = \frac{at}{b^2 L_1 C_0}$ ;

$J_1$  и  $Y_1$  - функции Бесселя первого и второго рода, соответственно, 1-го порядка. При  $z, z_0 \ll 1$  получаем уже известное решение 3.2.2. В противном случае для вычисления  $I_1$  необходимо учитывать негиче емкости в первичном контуре в согласии с формулой 3.3.4.

Важно, что конечный ток в нагрузке, как видно из выражения 3.3.2, не зависит от величины тока  $I_{1k}$  и в системе без потерь также определяется уравнением 3.2.4, однако скорость нарастания и конкретная форма импульса в нагрузке зависит от величины емкости в цепи заливки. На рис. 3.3.1. и 3.3.2. приведены расчетные величины токов в первом и во втором контурах, отнесенные к их характерным значениям при  $\alpha$  равных 1 -  $\alpha=10^{-2}$ , 2 -  $\alpha=1$ , 3 -  $\alpha=10$ , 4 -  $\alpha=100$ .

### 3.4. Модель БМГ с осевым иницированием

Рассмотрим работу БМГ с осевым иницированием заряда КВВ. В этом случае лайнер расширяется осесимметрично, поэтому его можно рассматривать как одновитковый соленоид с текущим радиусом  $r_3$ . В этом случае для определения параметров электрического импульса можно пользоваться формулами 3.2.2. с  $L_2 = L_0$ . Коэффициенты связи двух катушек длины  $h_1$  и радиуса  $r_1$  можно определить по приближенной формуле, представляющей первые члены разложения в ряд формул из [20]:

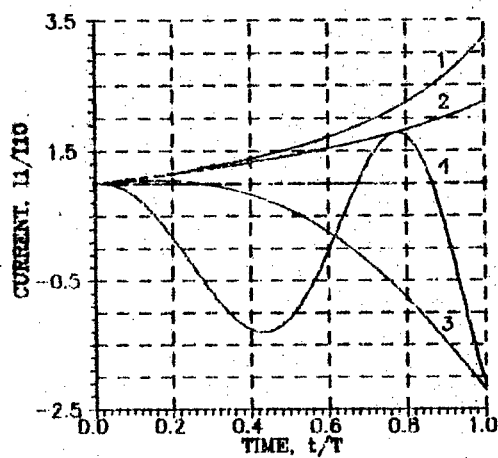


Рис. В.3.1. Зависимость тока в первичном контуре от времени в безразмерном виде.

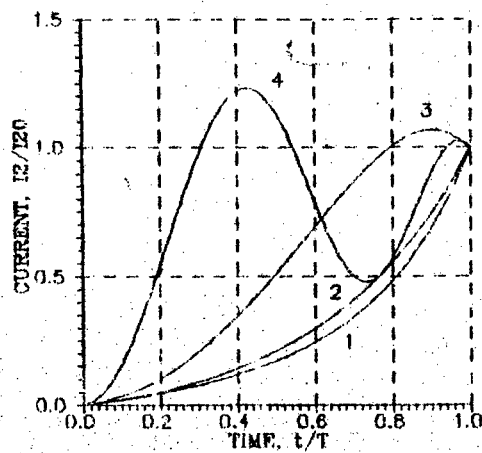


Рис. В.3.2. Зависимость тока во вторичном контуре от времени в безразмерном виде.

$$k_{1j} = \frac{r_j}{r_1} \frac{(\sqrt{1+x_1^2} - x_1 + x_j^2/8x_1)}{(1 - \frac{7x_1}{8} + \frac{x_1^2}{2})(1 - \frac{7x_j}{8} + \frac{x_j^2}{2})} \sqrt{h_j/h_1} \quad 3.4.1$$

где  $x_k = r_k/h_k$ ;  $k=1, j$ ;  $h_j < h_1$

Зависимости скорости и радиуса лайнера от времени по данным оптической съемки можно описать формулами

$$v_L = v_0 [1 - \exp(-t/t_0)];$$

$$r_3 = r_{30} + v_0 t - v_L t_0$$

В работе [11] показано, что вследствие скин-эффекта радиусы отличаются от их геометрических размеров. Толщину скин-слоя  $\delta = \sqrt{\pi \mu \sigma t}$  ( $x_0^{-1} = \mu \sigma$  - коэффициент диффузии магнитного поля) надо добавить к радиусам катушек

$$r_{1,2} = r_{1,2} + \delta; \quad r_3 = r_3 - \delta$$

В условиях работы [11] наилучшее согласие с экспериментальными данными получается при  $\sigma=2.5$  и коэффициенте перестройки

$$\lambda = (r_{20}^2 - r_{30}^2)/(r_{20}^2 - r_{3k}^2) \approx 5$$

Важное значение для работы генератора с осевым иницированием имеет выбор оптимальных соотношений между индуктивностями нагрузки и генератора. Если заданы параметры нагрузки, как это имеет место в нашем случае, то начальную индуктивность генератора  $L_{10} = L_{20}(1 - k_{230}^2)$  при его фиксированной геометрии следует выбирать из следующих соображений. Величина

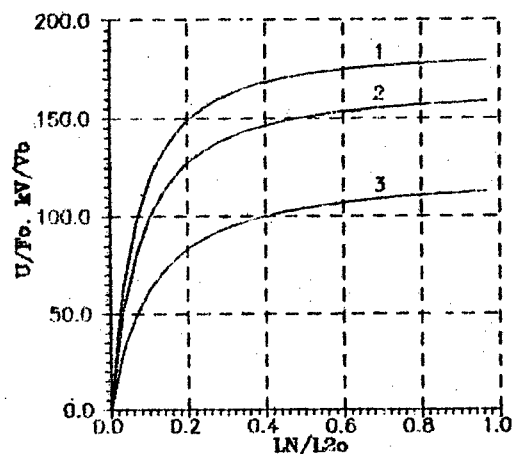


Рис. 3.4.1. Напряжение на нагрузке, отнесенное к начальному магнитному потоку, в зависимости от отношения индуктивностей

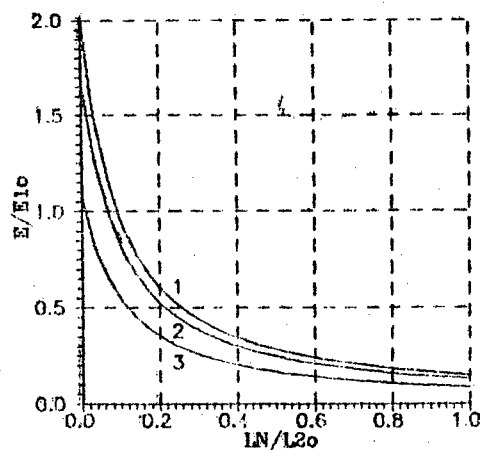


Рис. 3.4.2. Величина переданной энергии из первичного контура во вторичный в зависимости от отношения индуктивностей

тока  $I_2$  в нагрузке будет максимальна в том случае, когда генератор вырабатывает наибольшее напряжение. Действительно,  $U_{2\max} = L_H \frac{dI_2}{dt} \Big|_{t=\tau} \approx L_H \frac{I_{2k}}{\tau}$ . Анализ соотношений 3.2.2 показывает, что величина  $f = U_{2\max} / \Phi_{20}$  — функция только отношения  $x = L_H / L_{20}$ . На рис. 3.4.1 приведены зависимости  $f$  от  $x$  при  $\lambda = 5$  для трех случаев: 1 —  $c=0$ , 2 —  $c=1$ , 3 —  $c=2,5$ . Величина  $U_{2\max}$  здесь определялась путем численного дифференцирования соотношения 3.2.2б. Видно, что в отличие от расчетов в работе [11], в генераторах с "перехватом" потока нет оптимальных условий по напряжению. Необходимо выбрать  $x > 0,3$ . Однако, с точки зрения эффективности передачи энергии из первого контура во второй оказывается необходимым выбирать  $x=0$ , что показано на рис. 3.4.2. Приведенная на рисунке зависимость  $\Phi_E = E_{2k} / E_{10}$ , где  $E_{10} = L_{10} (1 - k_{130}^2) \cdot I_{10}^2 / 2$  — начальная энергия;  $E_{2k} = (L_H + L_{2k}) I_{2k}^2 / 2$ ,  $L_{2k} = L_{20} (1 - k_{23k}^2)$  — остаточная индуктивность ВМГ, показывает на чрезвычайно малые значения коэффициента передачи энергии  $\sim 10\%$  для ВМГ с осевым иницированием и перехватом потока, что связано с его малыми значениями коэффициента перестройки. Пути повышения  $\lambda$  для осевого генератора обсуждались в работе [11]. Другой путь — использование генераторов со скользящей точкой контакта. Они могут обеспечить высокие значения  $\lambda$ , однако не способны выдерживать высокие напряжения  $\geq 100$  кВ.

### 3.5. Модель работы ВМГ со скользящим контактом

Рассмотрим модель работы ВМГ с перехватом потока и скользящим контактом при произвольной форме лайнера. Разобьем лайнер на маленькие цилиндры и присвоим им индекс от 1-5 и выше. Предположим, что магнитные потоки внутри каждого цилиндра равны нулю, т.е.  $\Phi_1=0$ , а коэффициенты их связи между собой малы  $k_{1j} \ll 0$ ,  $1, j \geq 3$ . Тогда для токов в первичной и вторичной цепях получим уравнения

$$\frac{1}{C_0} \int I_1 dt + \frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{d}{dt}(L_p I_1) + I_1 R_1 = 0 \quad 3.5.1$$

$$\frac{d\Phi_2}{dt} + L_H \frac{dI_2}{dt} + I_2 R_2 = 0$$

где

$$\Phi_1 = L_1 \left(1 - \sum_{j=3} k_{1j}^2\right) I_1 + (k_{12} - \sum_{j=3} k_{1j} k_{2j}) \sqrt{L_1 L_2} I_2 \quad 3.5.2$$

$$\Phi_2 = L_2 \left(1 - \sum_{j=3} k_{2j}^2\right) I_2 + (k_{12} - \sum_{j=3} k_{1j} k_{2j}) \sqrt{L_1 L_2} I_1 \quad 3.5.3$$

Если потерями потока в первичном контуре можно пренебречь, а емкость считать достаточно большой, ток  $I_2$  будет описываться уравнением

$$\frac{dZ_2}{dt} + I_2 R_2 = 0 \quad 3.5.4$$

Здесь  $Z_2 = (L_{2e} + L_H) I_2 + k_B \sqrt{L_1 L_2} I_1$ ,

- эффективная индуктивность внутреннего соленоида -

$$L_{2e} = L_2 \left[1 - \sum_{j=3} k_{2j}^2 - (k_{12} - \sum_{j=3} k_{1j} k_{2j})^2 / \left(1 - \sum_{j=3} k_{1j}^2 + L_p/L_1\right)\right]$$

$$k_B = \frac{(1 - \sum_{j=3} k_{1j}^2 + L_p/L_1)}{(1 - \sum_{j=3} k_{1j}^2 + L_p/L_1)} (k_{12} - \sum_{j=3} k_{1j} k_{2j})$$

Начальным условием при  $t=0$  будет

$$Z_{20} = (k_{120} - \sum_{j=3}^n k_{1j0} k_{2j0}) \cdot \sqrt{L_1 L_{20}} I_{10}$$

Решение уравнения 3.5.4 -

$$Z_2 = Z_{20} \left[ 1 + \frac{1}{k_{20} \sqrt{L_{20}}} \int_0^t \frac{k_s \sqrt{L_2} R_2 \exp[F(t)]}{(L_{2e} + L_H)} dt \right] \cdot \exp[-F(t)]$$

$$F(t) = \int_0^t \frac{R_2(\tau) d\tau}{(L_{2e} + L_H)}$$

Для дальнейших расчетов необходимо задаться конкретным законом изменения индуктивности.

а) случай  $L_{2e} = L_{2e0}(1 - \beta t)$ ;  $R_2 = \text{const}$ ;  $k_s = k_{s0} \sqrt{1 - \beta t}$

В этом случае уравнение 3.5.4 интегрируется

$$I_2 = \frac{Z_{20}}{L_{2e0}(1-d)} \cdot \left[ \left( \frac{L_{2e} + L_H}{L_{2e0} + L_H} \right)^{d-1} - 1 \right], \quad (d \neq 1) \quad 3.5.5$$

$$I_2 = \frac{Z_{20}}{L_{2e0}} \ln \left( \frac{L_{2e} + L_H}{L_{2e0} + L_H} \right), \quad (d=1), \quad \text{где } d = R/\beta L_{2e0}.$$

В конце работы генератора в индуктивной нагрузке первоначально запасенная энергия увеличивается в

$$\phi_L = \phi_0 \cdot \left\{ \frac{a}{(1-d)} \cdot \left[ \left( \frac{a}{a+1} \right)^{d-1} - 1 \right] \right\}^2 \quad \text{раз.}$$

Здесь  $\phi_0 = \frac{k_{s0}^2 L_{20}}{(1-k_{130}^2) L_H}$



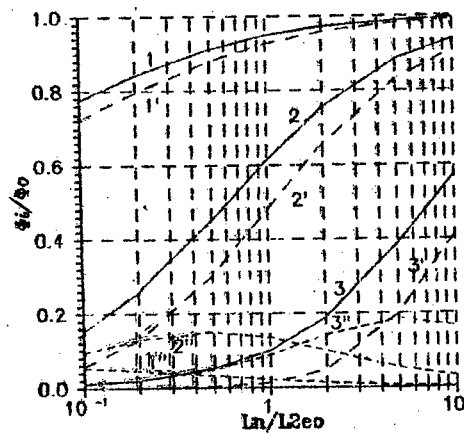


Рис 3.5.1. Коэффициент передачи энергии в нагрузку, отнесенный к его значению в цепи без потерь, в зависимости от отношения индуктивностей

- коэффициент усиления энергии в цепи без потерь,  $a = L_R / L_{2eo}$ .  
 В омической нагрузке при этом выделяется энергия  $E_R = \int_0^t R I_2^2 dt$ ,  
 тогда коэффициент передачи энергии в омическую нагрузку бу-  
 дет равен

$$\varphi_R = \varphi_0 \frac{a^2}{(1-d)^2} \left\{ 2 \cdot \left( \frac{a}{a+1} \right)^{d-1} + 2 \cdot \frac{(a+1)(d-1)^2}{a(2d-1)} - \right. \\ \left. - d \cdot \left[ 1 + \frac{1}{2d-1} \left( \frac{a}{a+1} \right)^{2(d-1)} \right] \right\}, \quad d \neq 1/2 \text{ и } d \neq 1$$

$$\varphi_R = \varphi_0 \cdot 2a \left[ 4\sqrt{a(a+1)} - a(a+1) \left( \ln \frac{a}{a+1} + 3 \right) \right], \quad d = 1/2$$

$$\varphi_R = \varphi_0 \cdot a \left[ a + 2 - a \cdot \left( 1 + \ln \frac{a+1}{a} \right)^2 \right], \quad d = 1$$

На рис.3.5.1 приведены зависимости  $\varphi_1/\varphi_0$  - пунктир-,  $\varphi_R/\varphi_0$  - мелкий пунктир и  $(\varphi_R + \varphi_L)/\varphi$  - сплошные кривые в зависимости от параметра  $a$  для  $d=0,1; 1; 10$ . По этим кривым, зная параметры генератора и потери в цепи, легко оцениваются возможности ВМГ по усилению энергии в нагрузке.

Полученными аналитическими выражениями для тока в нагрузке хорошо аппроксимируются реальные экспериментальные данные (см. 6.2.) путем подбора соответствующего значения  $R$ . Однако другой важный измеряемый параметр - скорость нарастания тока - в этой модели описывается плохо.

#### 6) Пятиконтурная модель ВМГ.

При торцевом иницировании заряда КВВ лайнер принимает форму, близкую к конической. Предположим, что после достижения внутренней спирали лайнер занимает ее место. Тогда лайнер можно разбить на три части (см. рис.3.1.1). Первая часть (индекс 2) - расширяющийся лайнер радиуса  $r_0$ , 2-я часть (индекс 4) - расширяющийся конус, и 3-я часть (индекс 5) - лайнер.

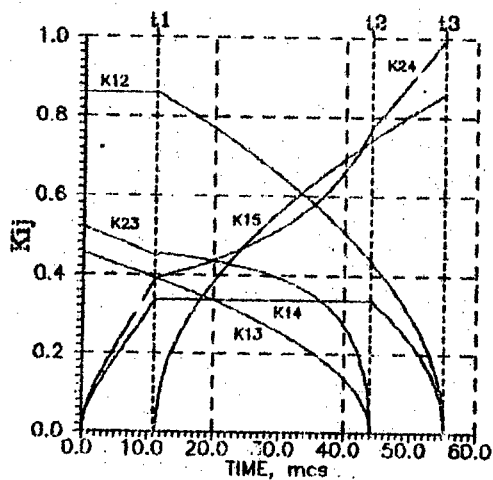


Рис. 3.5.2. Коэффициенты индуктивной связи, рассчитанные по геометрии ВМГ из эксперимента /6/ Таблицы 6.2

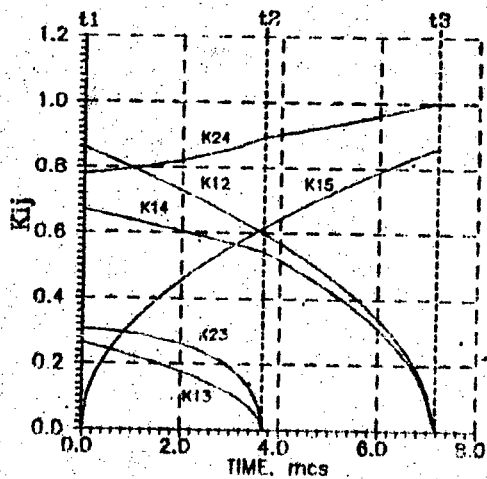


Рис. 3.5.3. Коэффициенты индуктивной связи, рассчитанные по геометрии ВМГ из эксперимента /11/ Таблицы 6.3

занявший место внутренней спирали. Рассмотрим общий случай, когда внутренняя и внешняя спирали также конические с радиусом в начале скольжения  $r_1$  и в конце -  $r_2$  и с коэффициентом связи  $k_{120}=1$ . Для оценки величины индуктивности конических спиралей будем считать, что шаг намотки постоянен и воспользуемся следующим соотношением:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 \pi r_{cp}^2}{1} \cdot K(r_{cp}/1) \quad 3.5.6$$

где  $r_{cp} = (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)/3$ ,  $K$  - поправочный множитель [20],  $r_1$ ,  $r_2$  - наибольший и наименьший радиусы конуса. В этом приближении мы заменяем коническую спираль на цилиндрическую с эффективным радиусом  $r_{cp}$ . Тогда для коэффициентов связи можно пользоваться приближенной формулой 3.4.1, где под  $r_1$  подразумеваются  $r_{10p}$ . Эти соотношения справедливы для бесконечных конусов, однако их можно применять с точностью ~10% для реальных конусов, что было проверено экспериментально.

Если по результатам оптической съемки известна скорость детонации KBB  $D$  и скорость расширения лайнера  $U$ , то траектория движения точки скольжения легко определяется аналитически:

$$x_{10} = Ut / (U/D - (r_1 - r_2)/1) ,$$

$$y_{10} = r_{10} - Ut / \left( \frac{U}{D(r_1 - r_2)} - 1 \right) ,$$

а время работы генератора  $\tau = L/D - (r_1 - r_2)/U$ .

Таким образом, в рамках предложенной модели нам известна геометрия системы в любой момент времени, а следовательно, известны все коэффициенты связи и зависимость индуктивности  $L_2$  от времени. На рис. 3.5.2. и 3.5.3. приведены расчетные величины  $k_{1j}$  в зависимости от времени для геометрий экспериментов № п.6.2 и № п.6.3, соответственно. В начальный момент значения  $k_{1j}$  равны измеренным значениям. В

момент  $t_1$  лайнер достигает спирали  $L_2$ .  $t_2$  соответствует моменту выхода детонационной волны из ВМГ и  $t_3$  - достижению точкой скольжения конца спирали  $L_2$ . Уравнение 3.5.4 позволяет вычислить изменение электрических параметров в цепи при работе генератора. Пятиконтурная модель хорошо описывает экспериментальные данные при использовании разумной функции потерь потока в генераторе.

#### с) Потери потока в генераторе.

В настоящей работе потери потока в генераторе учитывались в рамках модели, предложенной в работе [21], согласно которой

$$\Phi \approx -k \frac{dL_2}{dt} \dots$$

Коэффициент пропорциональности определялся путем сравнения с экспериментальными данными. Тогда в уравнении 3.5.4

$$R_2 = R_{2\text{ом}} + R_f$$

где  $R_f = k \frac{dL_2}{dt}$ , а скорость изменения индуктивности определяется численным дифференцированием соотношения 3.5.6.  $R_{2\text{ом}}$  - чисто омическое сопротивление цепи, включая сопротивление взрывающихся проводников.

#### 3.6. Замечания о выборе оптимального закона изменения индуктивности

При работе ВМГ на индуктивно-омическую нагрузку возникают значительные напряжения. Возможности генератора во многом определяются его способностью выдерживать напряжение между витками спирали, а также между лайнером и спиралью. Электрического пробоя в указанных местах можно избежать, делая толще изоляцию витков, что приводит к значительному увеличению потерь потока. Эксперимент показал, что для того, чтобы генератор со скользящим контактом работал, напряжение на

нагрузке не должно превышать  $\varepsilon \approx 100$  кВ. Очевидно, что максимально возможный ток можно получить, обеспечив постоянное и максимально допустимое напряжение  $\varepsilon$  в нагрузке в течение всей работы ВМГ. Тогда уравнение 3.5.4 запишется в виде:

$$L_2 \frac{dI_2}{dt} + k_B \sqrt{L_1 L_2} \frac{dI_1}{dt} = -\varepsilon + Z_{20}$$

$$L_2 \frac{dI_2}{dt} + I_2 R_2 = \varepsilon \quad 3.6.1$$

Если задан закон изменения  $R_2 = R_2(t)$ , то второе уравнение определяет закон изменения тока. Тогда из первого уравнения находим требуемый закон изменения  $L_2(t)/L_{20}$ . Для нахождения начальной индуктивности генератора воспользуемся следующими соображениями. Пусть будут заданы время работы генератора и энергия в первичной цепи  $E_{10} = L_1 (1 - k_{130}^2) I_{10}^2 / 2$ . Тогда максимально возможный поток  $Z_{20}$  определим из условия положительности правой части уравнения (3.6.1):  $Z_{20} = \varepsilon$ , а начальная индуктивность генератора определится соотношением

$$L_{20} = (\varepsilon t / k_{30})^2 / 2 E_{10}$$

В качестве примера на рис. 3.6.1 приведены кривые вывода индуктивности в одном из конических генераторов (кривая 1) и рассчитанная по соотношениям 3.6.1 (кривая 2) с функцией изменения сопротивления  $R_2 = R_{20} e^{kt}$ , аппроксимирующей стадию нагрева ЭВП. Видно, что начальную индуктивность генератора можно было взять значительно большую, а индуктивность генератора в конце работы лучше иметь более высокой.

Сделанный расчет можно рассматривать как грубо оценочный. Для корректного определения оптимального изменения индуктивности ВМГ необходимо более совершенные модели расчета индуктивностей произвольных катушек и их взаимных индуктивностей с переменным шагом спирали.

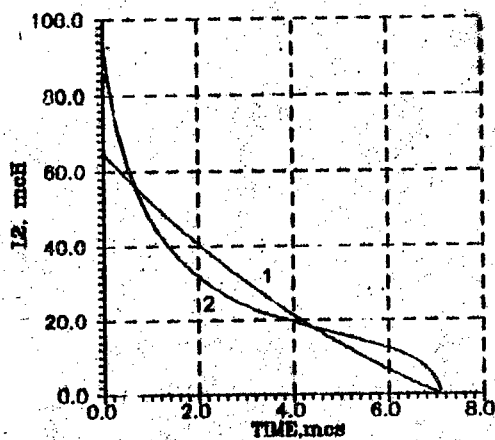


Рис. 3.6.1. Расчетная /2/ и экспериментальная /1/ зависимости изменения индуктивности

#### IV. Математическое моделирование процессов в электрической цепи с БМГ.

##### 4.1. Электрическая схема замещения цепи.

Из-за трудоемкости опытов с БМГ экспериментальный подбор оптимальных величин индуктивностей и параметров прерывателя становится очень долгим, поэтому была создана расчетная математическая модель процессов, происходящих в электрической цепи установки. Модель описывается системой дифференциальных уравнений для схемы замещения, в которую в качестве нелинейных элементов входят БМГ, ЭВП и вибратор.

Схема замещения электрической цепи, принятая для расчета, была приведена в главе II (рис.2.1.1). Элемент ИТ - источник тока зажигания; индуктивности  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  - первичная, вторичная обмотки и лайнер;  $L_n$  - нагрузка БМГ,  $L_{1n}$  - индуктивность внешней (первичной) цепи. Прерыватель и вибратор (тумод) представлены нелинейными сопротивлениями  $R_{вп}$ ,  $R_d$  и индуктивностями  $L_{вп}$ ,  $L_d$ ;  $K_1$  и  $K_3$  - замыкатели БМГ,  $K_2$  - обостряющий разрядник,  $C_{об}$  - обостряющая емкость.

Интересная для расчетов стадия процесса начинается с момента достижения максимума тока зажигания в первичной цепи, когда замыкаются ключи  $K_1$  и  $K_3$  и начинает работу БМГ.

Ниже описаны модели элементов цепи, система уравнений и дано краткое описание программы расчета.

##### 4.2. Безъёмкостный генератор

БМГ в электрической схеме замещения представлен в виде параметрических индуктивно связанных нелинейных сосредоточенных элементов цепи. В полной системе уравнений используется модель БМГ с осевым иницированием (см. параграф 3.4.), или пятиконтурная модель для цилиндрических и конических генераторов (см. параграф 3.5.).



### 4.3. Виркатор

С электротехнической точки зрения, виркатор представляет собой вакуумный диод, вольт-амперная характеристика которого описывается законом Чайльд-Ленгмюра при уменьшающемся расстоянии между катодом и анодом и с учетом прозрачности сетчатого анода:

$$I_D = \frac{A_0 S_K U_D^{3/2}}{(d_K - V_{пл} t)^2} \frac{1 - T^2}{1 + T^2} = \frac{F_0 U_D^{3/2}}{(1 - V_{пл} t / d_K)^2} \quad 4.3.1$$

где  $A_0 = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ А/В}^{3/2}$  - постоянная,  $U_D$  - напряжение на диоде,  $S_K$  - площадь катода,  $d_K$  - длина промежутка катод-анод,  $V_{пл}$  - скорость движения фронта плазмы,  $t$  - время,  $T$  - коэффициент прозрачности анода для электронов,  $F_0$  - начальный первичный ток диода. Скорость  $V_{пл}$  принимается постоянной. Параметры  $F_0$  и  $V_{пл}$  определяются из эксперимента.

### 4.4. Обостряющий разрядник

Нами использовалась модель обостряющего разрядника в виде источника напряжения с экспоненциальным спадом:

$$U_a = U_{a0} \exp(-t/t_{ком}) \quad 4.4.1$$

где  $U_a$  - напряжение на разряднике,  $U_{a0}$  - напряжение пробоя разрядника,  $t_{ком}$  - время коммутации.

Более сложная резистивная модель не использовалась, так как неизвестны ее параметры. Кроме того, разрядник сравнительно слабо влияет на параметры импульса.

### 4.5. Электровзрывной прерыватель тока.

4.5.1. Существует ряд моделей ЭВП разной сложности. Наиболее совершенные и точные в настоящее время - это магнитогидродинамические модели [14]. Однако они представляют высо-

кие требования к ресурсам компьютеров и квалификации расчетчиков, и их применение в электротехнических расчетах не оправдано. Имеются также инженерные модели, представляющие собой более или менее удачные аппроксимации поведения сопротивления ЭВП, которые получают в результате решения обыкновенных дифференциальных уравнений. При их использовании к системе уравнений электрической цепи добавляются уравнения для ЭВП. Такие модели не всегда адекватно отражают особенности ЭВП, например, они не учитывают обратное влияние подключаемой нагрузки на сопротивление ЭВП. Однако они вполне пригодны для проведения оптимизационных расчетов.

4.5.2. Инженерная модель ЭВП, принятая в настоящей работе, разработана в НИИВН и в тезисном виде опубликована в [13]. В этой модели различаются две стадии электрического взрыва: стадия нагрева и стадия собственно взрыва. Расчетное удельное сопротивление представляется в виде произведения двух сомножителей:

$$r = \rho \cdot \eta,$$

4.5.1

один из которых -  $\rho = \rho(w)$  - функция удельной введенной энергии  $w$ , а другой -  $\eta$  -, условно говоря, представляет часть сопротивления, связанную с расширением металла в ходе взрыва. Зависимость  $\rho(w)$  имеет кусочно - линейную (ломаную) форму:

$$\rho(w) = \rho_1 + \beta_1(w - w_1), \quad i = 1, 2, 3, 4, \dots \quad 4.5.2$$

где  $\rho_1$  и  $w_1$  - значения  $\rho$  и  $w$  в точках излома,  $\beta_1$  - угловые коэффициенты наклона на разных участках. Физически точка 1 соответствует комнатной температуре, точки 2 и 3 - началу и концу плавления, точка 4 взята как подгоночный параметр модели.

Зависимость от энергии второго сомножителя дается уравнением:

$$\eta = 1 \quad \text{при } w \leq w_5 \text{ (стадия нагрева)}$$

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{\eta \cdot v(w)}{r_0} \quad \text{при } w \geq w_5 \quad 4.5.3$$

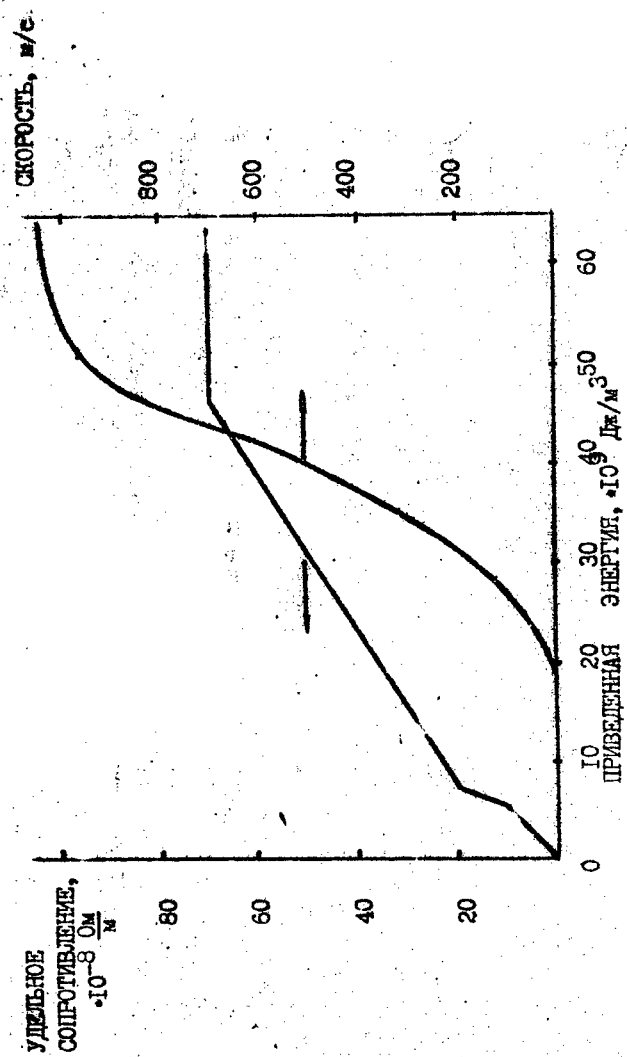


Рис. 4.5.1. Графики функций  $\rho$  и  $v$  ЗВП, используемые в расчетах.

где  $r_0$  - начальный радиус проводника,  $w_5$  - точка начала стадии взрыва,  $v(w)$  - функция удельной энергии, определяемая из эксперимента, условно говоря, "скорость расширения" (она имеет размерность скорости).

Установлено, что в довольно широком диапазоне по скорости нагрева функция  $v(w)$  однозначна. Ее можно описать выражением:

$$v(w) = \begin{cases} 0 & , \text{ при } 0 \leq w < w_5 \\ A_1(w-w_5)^2 & , \text{ при } w_5 \leq w < w_6 \\ \frac{A_2(w-w_6)}{(w-w_6)+A_3} + A_4 & , \text{ при } w \geq w_6 \end{cases} \quad 4.5.4$$

Графики функции  $\rho(w)$  и  $v(w)$  приведены на рис.4.5.1. Значения параметров сведены в таблицу 4.1.

Принтегрировав 4.5.3 и подставив в 4.5.1, можно получить явное выражение для сопротивления ЭВП:

$$R_{ЭВ}(w, t) = \frac{1}{S} \cdot \rho(w) \cdot \exp\left(\int_0^t \frac{v(w)}{r_0} dt\right) \quad 4.5.5$$

Экспоненциальный член отражает инерцию разлета продуктов взрыва и неоднозначную зависимость сопротивления от введенной энергии при разных плотностях тока.

Кроме написанных выше уравнений и формул, нужно еще вводить дифференциальное уравнение для энергии:

$$\frac{dw}{dt} = \rho I^2 / S^2 \quad 4.5.6$$

где  $I$  - ток ЭВП,  $S$  - площадь сечения всех проволок (начальная).

Таблица 4.1

$w_1$	$10^9 \text{ Дж м}^3$	$\rho_1$	$10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$\beta_1$	$10^{-17} \text{ Ом} \cdot \text{м}^4 \text{ Дж}$
$w_1$	0	$\rho_1$	1,7	$\beta_1$	1,88
$w_2$	5,0	$\rho_2$	11,1	$\beta_2$	5,11765
$w_3$	6,7	$\rho_3$	19,8	$\beta_3$	1,01626
$w_4$	46,0	$\rho_4$	59,74	$\beta_4$	0
$w_1$	$10^9 \text{ Дж м}^3$	$A_1$			
$w_5$	46,0	$A_1$	$0,894 \cdot 10^{-18} \text{ (м с)}$	$(\text{Дж м}^3)^2$	
$w_6$	46,0	$A_2$	315,4 м с		
		$A_3$	$5,88 \cdot 10^9 \text{ Дж м}^3$		
		$A_4$	804,6 м с		

Таблица 4.2

Интервал энергий $\psi$ , $\text{ГДж м}^3$	$a_i$		$b_i$	$c$
	$\text{В м}^{\frac{1}{2}}$	$\text{кВ мм}^{\frac{1}{2}}$	$\text{ГДж м}^3$	$\text{км с}$
48,0	$1,931 \cdot 10^5$	6,264	140	
48+120	$2,467 \cdot 10^4$	0,78	40	0,137
120	$1,767 \cdot 10^4$	0,5589	0	
$(\text{В м}^{\frac{1}{2}})^{\frac{D}{2}} \cdot (\text{Дж м}^3)^{-\beta_1}$ $(\text{с м})^{-\beta_2}$	$(\text{кВ мм}^{\frac{1}{2}})^{\frac{D}{2}} \cdot (\text{Дж м}^3)^{-\beta_1}$ $(\text{мкс мм})^{-\beta_2}$	$\theta_1$	$\beta_2$	
$6,9 \cdot 10^8$	488,6	-0,71	-1,58	

Уравнения 4.5.1 - 4.5.6 описывают только рост сопротивления ЭВП. Для участка падения сопротивления, обусловленного ионизацией продуктов взрыва, у нас пока модели нет. Для определения длины проволок ЭВП в нашей модели используется критерий пробоя продуктов взрыва и вычисление их электрической прочности, что показано в следующем пункте.

4.5.3. Пробивные напряжения для ЭВП из медных проволок в воздухе приведены в [22]. Характер зависимостей оказывается разным в разных стадиях разлета продуктов, так что следует различать "кратковременную" и "длительную" электрическую прочность. Далее, для электрической прочности имеет место подобие вольт-секундных характеристик (в.-с.х.) проволок разного диаметра: для подобных условий совпадает в.-с.х. в координатах  $E_n \sqrt{d}$ ,  $t/d$ , где  $E_n$  - электрическая прочность,  $E_n = U_n/l$ ,  $U_n$  - пробивное напряжение,  $l$  - длина,  $d$  - диаметр проволоки. Подобные условия - это, главным образом, одинаковая удельная введенная энергия.

Область кратковременной прочности включает пик напряжения и временной интервал примерно до  $t/d = 6$  мс/м. Пробой происходит в поверхностном слое продуктов взрыва, до пробоя продукты обладают заметной электропроводностью. Приведенная электрическая прочность  $E_n \sqrt{d}$  возрастает с увеличением энергии и быстро убывает со временем:

$$E_n \sqrt{d} = a_1 \exp \left[ -\frac{b_1}{w} - \frac{\sigma t}{d} \right], \quad i=1,2,3 \quad 4.5.7$$

Значения параметров  $a_1$ ,  $b_1$  зависят от интервала энергий  $w$ .

Величина электрической прочности в кратковременной области имеет большой разброс, и формулу надо рассматривать как ориентировочную. Строго говоря, в этом интервале вообще нельзя говорить о пробое и пробивном напряжении, а надо говорить о возрастании проводимости продуктов взрыва (см. выше).

Область "длительной" электрической прочности охватывает времена от  $t/d = 15$  мс/м до  $t/d = 100$  мс/м, когда электрическая прочность выходит на остаточное значение, соответствующее "бесконечной" паузе тока. В этой области длитель-

ность паузы тока хорошо воспроизводима с разбросом  $5 \pm 10\%$ . Регрессионное уравнение для вольт-секундных характеристик имеет вид:

$$E_n \sqrt{d} = D w^{\beta_1} (t/d)^{\beta_2} \quad 4.5.8$$

Значения параметров, входящих в формулы 4.5.7 и 4.5.8, приведены в таблице 4.2.

Значения параметров  $\alpha_1$  и  $D$  приведены не только в единицах СИ, но и в единицах, использованных в программе.

Что касается интервала времен  $t/d = 6 \pm 15$  мс/м, то в этом интервале пробой не наблюдался: он происходит раньше или позже. В модели принято, что в этом интервале электрическая прочность также описывается уравнением 4.5.8.

За начало отсчета времени в модели принят момент, когда удельное сопротивление  $\rho = 4 \cdot 10^{-6}$  Ом·м.

#### 4.6. Система уравнений электрической цепи

Уравнения цепи, составленные по схеме рис.2.1.1 методом контурных токов, имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_1}{dt} &= -I_1 R_1 \\ \frac{d\Phi_2}{dt} &= D_2 \\ \frac{dI_3}{dt} &= (D_2 + R_{ВП} I_3 + R_f I_2) / L_{ВП} \\ \frac{dI_4}{dt} &= - (D_2 + U_a + U_D) / L_D \\ \frac{dU_2}{dt} &= - (I_2 - I_3 - I_4) / C_{ОВ} \end{aligned} \quad 4.6.1$$

Здесь используются обозначения, примененные в предыдущих параграфах. Написанная система дополняется уравнениями для ЭВН, рассмотренными в п.4.5. Потоки  $\Phi_i$  связаны с соответ-

связанными токами в контурах уравнениями:

$$\Phi_1 = (L_{1ef} + L_p) I_1 + k_s \sqrt{L_1 L_2} I_2$$

$$\Phi_2 = (L_{2ef} + L_H) I_2 + k_s \sqrt{L_1 L_2} I_1$$

Здесь  $L_{1ef} = L_1 (1 - \sum_{j=3}^n k_{1j}^2)$ .

Начальные условия задаются для момента  $t=0$ , когда замыкаются ключи  $S_1$  и  $S_3$  и для момента  $t=t_b$  пробоя разрядника  $S_2$ . При  $t=0$  -  $I_3=I_4=0$ ;  $D_2=0$ ;  $\Phi_t=\Phi_{t0}$

$$\Phi_{10} = (L_{1ef0} + L_{p0}) I_{10}; \Phi_{20} = k_{s0} \sqrt{L_1 L_2} I_{10}$$

Для момента  $t=t_b$ :  $\Phi_t(t_b-0) = \Phi_t(t_b+0)$  - условие непрерывности  $\Phi_t$  и  $I_4(t_b)=0$ .

## 1.7. Программа расчета режимов электрической цепи

4.7.1. Метод и программа интегрирования дифференциальных уравнений. Мы использовали один из распространенных методов - метод Рунге-Кутты 4-го порядка с автоматическим выбором шага по заданной точности. Программа, реализующая этот метод, взята из [23] под именем DE13R. Она входит в библиотеку программ НИВЦ МГУ.

4.7.2. Программа расчета уравнений цепи под именем TOMOS разработана нами на языке Фортран-77 для персональных компьютеров типа IBM PC. Она содержит программу и ряд подпрограмм. Подпрограммы выполняют следующие функции:

TOMOS - ввод исходных данных, вывод на дискету результатов расчетов в виде зависимостей различных величин от времени.

PROCESS - подготавливает начальные условия для уравнений, вызывает программу интегрирования DE13R, вычисляет текущие значения токов, напряжений, мощности, энергии; контролирует пробой обостряющего разрядника и определяет момент пробоя методом квадратичной интерполяции; вызывает под-



программу определения пробивного напряжения ЭВН; вычисляет максимумы напряжений и токов; вычисляет длительность фронта напряжения.

DE/3R - интегрирует систему уравнений.

PRAV1, PRAV2 - вычисляют значения правых частей системы уравнений.

ROV - вычисляет функции  $p(\psi)$ ,  $u(\psi)$ ,  $r(\eta, t)$

BREAK - вычисляет пробивное напряжение ЭВН.

UD1ODE - вычисляет напряжение на диоде.

CCUP - вычисляет коэффициент связи.

SCURP - вспомогательная подпрограмма квадратичной интерполяции.

MAXI - вспомогательная подпрограмма вычисления точки максимума.

Входная информация программы - это все величины, входящие в модель (35 величин). Имена входных и выходных величин определены в файле комментариев с именем COMMENT.TXT. В программе использована система единиц: мкс, кА, О, мГн, мм.

Программа выдает по желанию пользователя значения следующих текущих величин: T - время; IWIRE - ток ЭВН, IDIOD - ток диода, UDVV - напряжение на делителе ЭВН, UDVD - напряжение на делителе диода.

Кроме того, выдаются значения интегральных величин и характерных точек:

IWMAX, IDMAX - максимумы токов ЭВН и диода,

UDK - максимум напряжения на делителе диода,

TPR - время нарастания по 0,1-0,9 амплитуды напряжения на делителе.

POWMAX - максимальная мощность на нагрузке,

ENERGY - энергия, выделенная в диоде за время, когда напряжение на нем превосходит уровень ULE(EL).

Входная и выходная информация помещаются соответственно в файлы INPUT.DAT и RESULT.DAT.

В настоящее время разрабатывается программа графического вывода информации.

Настоящая программа работает только при нулевых (и

не слишком малых) значениях  $L_{\text{ВП}}$ , поэтому даже если она неизвестна, ее все равно нужно задавать.

Входную информацию можно задавать как предварительно в файл входных данных, так и в диалоговом режиме с клавиатуры.

4.7.3. Наряду с описанной выше разрабатывается программа оптимизации TOMOS OPT, предназначенная для расчета оптимальных параметров мощности на нагрузке, либо максимум введенной энергии. Конечно, истинным критерием оптимальности должен служить максимальный выход излучения, но у нас нет пока модели, связывающей излучение с параметрами импульса.

Основой программы служит программа минимизации функций на ограниченном множестве методом скользящего допуска, взятая из [24] с именем FLEXI. Программа, вычисляющая значения целевой функции, остается той же -PROCESS и относящиеся к ней.

## V. Описание экспериментального стенда

Экспериментальный стенд, на котором проводились эксперименты, развернут на базе электродинамической установки ИХФ АН СССР. Он состоит из взрывной металлической камеры, в которой проводился подрыв РМГ; низковольтной батареи конденсаторов; наконительной индуктивности, электровзрывного прерыва для тока, обостряющего разрядника и обостряющей емкости, конструктивно размещенных в одном блоке; искратора, включающего в себя вакуумный диод с проходным изолятором и системой вакуумной откачки; генератора импульсных напряжений на 500 кВ. Схематически установка изображена на рис.5.1.

### 5.1. Состав стенда

#### 5.1.1. Взрывная камера.

Основной деталью взрывной камеры является стальной корпус диаметром 3 м длиной 5 м и толщиной стенки 30 мм. С

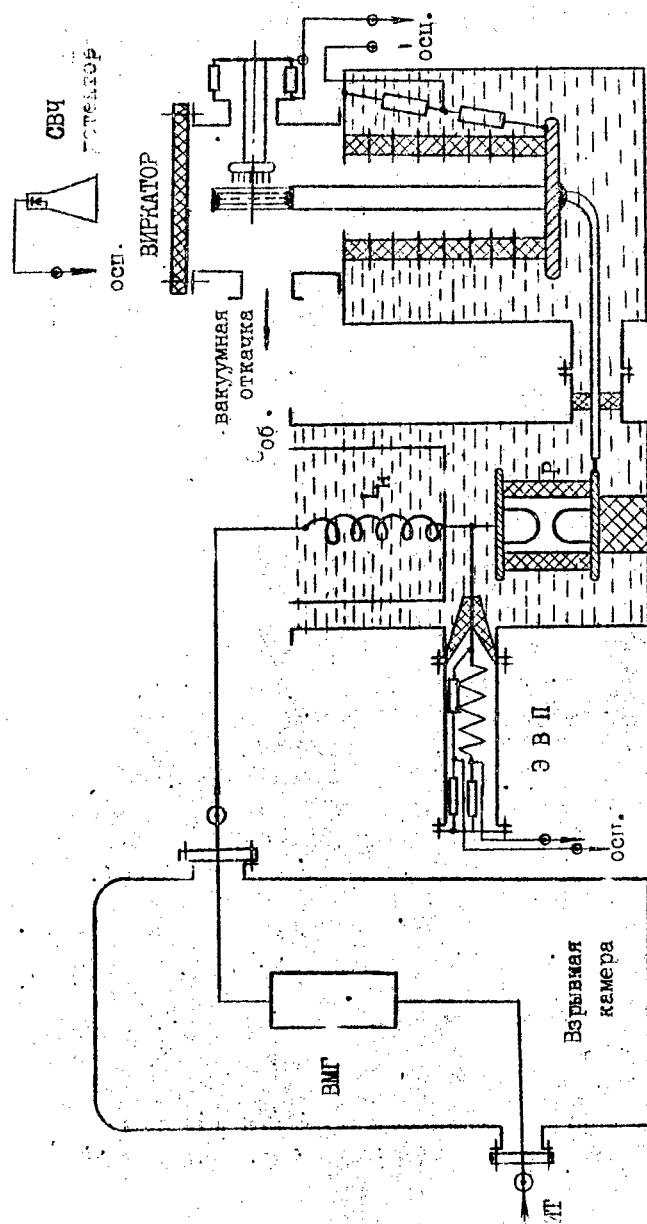


Рис. 5.1. Схема установки.

одного бока сосуд закрыт стальной крышкой, которая прижимается к нему с помощью 60 болтов и гаек М40. В крышке располагаются отверстия для входа в камеру, электрических вводов и иллюминаторов. Входное отверстие диаметром 0,7 м закрывается металлическими дверями. Внутренняя дверь состоит из двух массивных половин и предназначена для отсечки прямого воздействия ударных волн на внешнюю дверь, которая плотно прижимается к крышке с помощью шести болтов М20. Подключение системы продувки продуктов взрыва осуществляется через специальный клапан, расположенный во фланце сосуда с другого бока. Для предотвращения пробивания камеры осколками взрывом магнитных генераторов внутренняя поверхность сосуда снабжена заменяемой противосколочной защитой, состоящей из трех слоев листов сталь-алюминий-сталь толщиной по 10 мм. Энергия от низковольтной батареи конденсаторов передается внутрь камеры с помощью коаксиального малоиндуктивного электроввода, выдерживающего токи до 500 кА при напряжении до 15 кВ. Для удобства подключения ВМГ к батарее внутри камеры имеется монтажный столик. Вывод электрических импульсов осуществляется через соответствующий фланец четырьмя кабелями типа КВИ, разрушающимися в каждом взрывном эксперименте. Взрывная камера установлена в горизонтальном положении на специальной подставке, амортизированной автомобильными шинами, и заглублена на 0,5 м относительно пола. Общий вес конструкции около 25 тонн. При испытаниях камеры были произведены подрывы зарядов А-IX-1 весом до 6 кг. При постоянной работе камера предназначена для экспериментов с зарядами до 2 кг тротилового эквивалента.

#### 5.1.2. Низковольтная батарея конденсаторов.

Батарея состоит из 420 конденсаторов К-41-И7 на 5кВ-100 мкФ, разбитых на 3 секции. Они включены последовательно по две штуке, что позволяет запасать энергию ~0,5 МДж при напряжении до 10 кВ. Для зарядки батареи применяется повышающий трансформатор ТМ-25/10, выпитка которого осуществляется от стандартной трехфазной сети на 220 В через регулируемые латеры. Использование выпрямителя на диодах КД203 и

зарядных сопротивлений на резисторах ПЭВ-100 позволяет обеспечить зарядные токи до 10 А и время зарядки всей батареи не более двух минут. После окончания зарядки конденсаторов цепь зарядки отключается от батареи выключателями ВВ-5. Аварийный вывод энергии из конденсаторов осуществляется через балластные сопротивления, отдельные для каждой секции. Для защиты секций от пробоев одного из конденсаторов предусмотрены остродействующие высоковольтные предохранители на взрывающихся медных вставках диаметром 0,8-1 мм и длиной около 10 см. В качестве коммутаторов в схеме применены игнитронные разрядники ИРТ-6 по 2 штуки на секцию. Эти разрядники позволяют производить подключение секций в заданные моменты времени на свою нагрузку. В случае коммутации всех секций на одну высокоимпедансную нагрузку используется специальная схема выравнивания потенциалов. В режиме короткого замыкания батарея позволяет получить во взрывной камере токи до 500 кА. Энергия батареи от разрядников к коаксиальному электровводу передается пучком кабелей ЭКП. В настоящих экспериментах использовалась одна секция, емкость которой в зависимости от требований к опыту изменялась в пределах  $C=1\pm 3$  пФ.

#### 5.1.3. Накопительная индуктивность.

Конструкция обеспечивает динамическую устойчивость под воздействием пндеромоторных сил, возникающих при протекании больших импульсов тока. На диэлектрическую трубу с внешним диаметром 100 мм намотана медная шинка. Для изменения величины индуктивности обмотка имеет несколько высоковольтных выводов. Снаружи шинка обтягивается стеклотканью, которая пропитана эпоксидной смолой. Для снижения электрической напряженности на концах индуктивности надеваются охранные кольца, которые одновременно являются электродами для крепления высоковольтного кабеля от ВМГ, ЭВП, разделительного разрядника.

#### 5.1.4. Обостряющий разрядник.

Разрядник должен осуществлять быструю коммутацию энер-

гии, запасенной в накопительной индуктивности в необходимый момент времени на анод триода. Разрядник представляет собой газовый коммутатор на напряжение 500 кВ. Материал изоляционной камеры разрядника - оргстекло. Рабочий газ - смесь азота с эле-газом ( $\text{SF}_6$ ). Материал электродов - Ст.45. Изоляционная камера выполнена из двух секций внешним диаметром 182 мм и внутренним 142 мм. Высота каждой секции 95 мм. Электроды представляют собой полусферы диаметром 60 мм. Электроды закрепляются на металлических фланцах. Фланцы и секции стягиваются наплавочными шпильками. Изменение пробивного напряжения осуществляется изменением давления газа и расстоянием между электродами.

#### 5.1.5. Опорный изолятор.

Изолятор выполнен из полиэтилена, имеет цилиндрическую форму длиной 240 мм. Принимая пробивную электрическую прочность по поверхности полиэтилена в трансформаторном масле ~ 100 кВ/см, его высота должна выдержать напряжение до 1 МВ. С торцов изолятора расположены металлические фланцы. С помощью нижнего фланца изолятор крепится к нижней крышке бака, а с помощью верхнего - к обостряющему разряднику.

#### 5.1.6. Электровзрывной прерыватель тока (ЭВП).

ЭВП представляет собой набор из нескольких десятков (30-50) медных проволочек диаметром 0,05-0,06 мм, намотанных по спирали на изоляционные диски с угловым сдвигом относительно друг друга. За основу конструкции прерывателя взят прерыватель по А.С.№719367. Диски (из винипласта) размещены на несущей винипластовой трубе с шагом, задаваемым дистанционирующими патрубками. Внутри несущей трубы размещен проволочный малоиндуктивный делитель напряжения. ЭВП-прерыватель снабжен также мунтом тока, выполненным из набора малоиндуктивных сопротивлений типа ТВО. Сборка ЭВП помещена в специальную камеру, снабженную изолятором, предотвращающим пробой с высоковольтной стороны прерывателя на землю (корпус камеры). Для предотвращения пробоев вдоль прерывателя камера заполняется азотом под давлением до 4 атм. Исключение пробо-

ев вдоль прерывателя достигается также выбором соответствующей длины проволочек.

#### 5.1.7. Обостряющая емкость.

Обостряющая емкость представляет собой коаксиальный конденсатор высотой 1,2 м, в качестве одной из обкладок которого используется цилиндрический стальной бак диаметром 470 мм для размещения разрядника и накопительной индуктивности. Високовольтной обкладкой конденсатора служит металлическая обечайка, помещенная в бак с зазором 25 мм от его стенок, что обеспечивало пробивное напряжение не менее 1 МВ. Обечайка размещается на верхнем фланце разрядника. Измеренная величина емкости в трансформаторном масле составила  $C_{об} = 1,1$  нФ.

#### 5.1.8. Высоковольтный изолятор триодного генератора.

Изолятор размещен в металлическом баке цилиндрической формы, высотой 100 мм, диаметром 800 мм. Изолятор состоит из 10 секций из оргстекла, между которыми установлены градиентные металлические кольца. С целью принудительного распределения потенциала на наружной поверхности между градиентными кольцами установлены активные сопротивления типа ТВО величиной 1 кОм. Секционированный изолятор размещен между металлическими фланцами, которые стягиваются стержнями из капролона. На высоковольтном фланце укреплен анододержатель, выполненный из нержавеющей трубы, с сетчатым анодом триода на конце. Для оценки работы источника напряжения на нагрузку, представляющую собой триодный генератор, проводятся измерения тока и напряжения в генераторе. Импульс тока, протекающего через катод-анодный промежуток генератора, регистрируется на скоростном осциллографе СЛОП-4М, снимаемого с датчиков тока, выполненных в виде пояса Роггсского и шунта обратного тока. Для измерения ускоряющего напряжения в триодной системе используется активный делитель напряжения, подключенный к высоковольтному фланцу секционированного изолятора. С низкоомного плеча делителя импульс напряжения снимается на осциллограф СЛОП-4М.

#### 5.1.9. Триод с виртуальным катодом.

Триодный генератор состоит из металлической вакуумной камеры, по оси которой расположен анододержатель. На конце анододержателя закреплен анод, выполненный в виде сетки. Напротив анода устанавливается многоострый взрывомиссионный катод. Для вывода СВЧ мощности из камеры на ее торце установлено окно из оргстекла. При разработке триода для эффективной его работы тщательно выбирались анод, катод и электродинамическая система (геометрия вакуумной камеры), соответствующие параметрам источника питания и формируемого импульса напряжения.

**К а т о д.** Было установлено, что длительность импульсов СВЧ излучения в триоде ограничивается временем переключения плазмой катод-анодного промежутка. Уменьшить скорость распространения плазмы и, следовательно, увеличить время переключения можно путем улучшения равномерности распределения плазмы по поверхности катода. Такой режим реализуется при многоострийном катоде. Установлено также, что одним из условий достижения высокой эффективности генерации и стабилизации частоты излучения является формирование однородного по сечению электронного потока. В случае отсутствия внешнего магнитного поля наиболее однородные по сечению электронные потоки получаются тоже с помощью многоострийного катода. Не менее важным является и выбор материала катода. Известно, что скорость распространения плазмы на графитовых остриях меньше, чем на остриях из стали и меди. Проведенные нами эксперименты показали, что использование графитовых остриев позволяет увеличить длительность импульса напряжения по сравнению с медными или стальными. Однако, при длительной работе графитового катода наблюдается его значительная эрозия. При больших токах графитовые острия разрушаются и загрязняют вакуумную камеру. Это накладывает ограничения на использование графитовых остриев в катодах триодной системы. Опыт работы с катодами показал, что при длительностях СВЧ импульсов в сотни наносекунд наиболее оптимальными являются многоострийные катоды с металлическими остриями.



**А н о д.** В триодных системах для генерации импульсов СВЧ излучения большой длительности используются сетчатые аноды. При этом в зависимости от формы и амплитуды импульса напряжения прозрачность сетки должна иметь вполне определенное значение. Так, для напряжения до 500 кВ с фронтом импульса 20 нс и длительностью импульса 80 нс оптимальной является сетка с прозрачностью 0,7–0,75. При этом диаметр анода должен удовлетворять соотношению  $D_a/D_k > 1,5$ , где  $D_a$  – диаметр анода, а  $D_k$  – диаметр катода. Такое соотношение определяется увеличением эффективного диаметра электронного пучка за счет расширения эмиттирующей границы катодной плазмы в поперечном направлении. При несоблюдении указанного соотношения часть электронов пучка проходит мимо анода и не участвует в процессе генерации. На уровень мощности излучения существенное влияние оказывают однородность сетки и параллельность ее расположения относительно поверхности катода.

**Вакуумная камера триода.** Вакуумная камера с расположенными в ней катодом и анодом во многом определяет размеры СВЧ генератора и поэтому нахождение оптимального размера камеры – один из основных вопросов. Были проведены эксперименты по влиянию объема вакуумной камеры на процесс генерации. Объем камеры меняли от 0,03 до 0,4 м<sup>3</sup>. Дальнейшее уменьшение объема ограничивалось размерами катодного и анодного узлов, электрической прочностью. Уровень мощности излучения был одного порядка, но увеличение объема камеры приводило к изменению величины пускового тока. С увеличением объема камеры увеличивается пусковой ток, что можно объяснить ослаблением обратной связи. Был установлено, что с увеличением обратной связи эффективность генерации возрастает, а пусковой ток уменьшается.

#### 5.1.10. Генератор импульсных напряжений.

Генератор импульсных напряжений на 500 кВ состоит из семи конденсаторов типа ИК-100-0,25У4, собранных по схеме Аркадьева-Маркса с емкостью в ударе  $C_y = 36$  нФ и запасаемой энергией до 4,5 кДж. Зарядка конденсаторов осуществляется с

помощью установки УВ- 50-50 до 70 кВ. В качестве коммутаторов используются воздушные шаровые разрядники, один из которых управляемый. В режиме короткого замыкания генерируются токи до 25 кА со временем достижения максимума тока около 1 мкс.

## 5.2. Система измерений.

Система регистрации и контроля параметров установки. В экспериментах снимали осциллограммы для

1. тока и напряжения в цепях ВмГ,
2. тока в цепи ЭВП и полного тока диода,
3. напряжения на ЭВП и диоде,
4. СВЧ-сигнала.

Ток через ЭВП и полный ток на диоде измерялись шунтом из резисторов ТВО-0.25. Шунт предварительно градуировался в специальном LC- контуре с малым затуханием на частоте 30 кГц.

Напряжение на ЭВП измерялось проволочным малоиндуктивным делителем; на диоде - делителем, собранным из резисторов ТВО-2. Переходные характеристики делителей снимались путем подачи импульса от специального калибровочного генератора импульсов с амплитудой 50-200 В и фронтом 2-3 нс.

Кроме того, производилась градуировка делителей на высоком напряжении (10-30 кВ). Коэффициенты делителей в обоих случаях совпадали с точностью до погрешности измерения.

Особое внимание уделялось подавлению помех в измерительных линиях, для этой цели кабели прокладывались в стальных трубах или металлических оплетках. Для подавления синфазных помех применялись резекторные дроссели в виде отрезков кабелей, намотанных на ферритовые кольца. Проводилась оценка уровня помех без работы изделия. Она не превышала 3-5% от амплитуды полезного сигнала при испытаниях установки.

Регистрация СВЧ сигнала осуществлялась с помощью лампового СВЧ-диола типа БДЗД. Мощность оценивалась по диаграмме нап. излучения с фиксированной длиной волны.

Ток ВмГ и его производная регистрировались двумя пояса-

ми Роговского в цепях запитки и нагрузки вне взрывной камеры. В экспериментах с запиткой от спиральных ВМГ два дополнительных пояса размещались во взрывной камере в цепи с током, генерируемым запиточным ВМГ. Их тарировка осуществлялась перед каждым экспериментом.

Регистрация микросекундных сигналов осуществлялась осциллографами С9-3, наносекундных - на ГЛОР-04М.

Для подрыва КВВ использовалась установка ВУ-19. Запуск батарей конденсаторов, устройств для подрыва КВВ и регистрирующих приборов осуществлялся генераторами задержанных импульсов ГЗИ-1 в заданные моменты времени.

Для избежания наводок, обусловленных случайными полями и возникающих при работе высоковольтной аппаратуры, ВМГ, ЭВП и вир. тора, измерительные осциллографы помещались в специальной экранированной комнате.

## VI. Экспериментальные исследования работы ВМГ с "перехватом" потока на индуктивную нагрузку

Проведенные ранее исследования ВМГ с осевым инициированием [11] показали, что эти генераторы способны обеспечить требуемые параметры по току и напряжению. Однако, из-за наличия в цепи нагрузки длинного предимпульса запитки, переключение тока ЭВП на вириатор растянуто, и генерируемые при этом напряжения не превышают 50 кВ. Чтобы обеспечить резкое переключение тока (взрыв ЭВП), были разработаны ВМГ с осевым инициированием и перехватом потока, позволяющие формировать в нагрузке требуемые параметры за время  $\leq 10$  мкс. Эксперименты с этими ВМГ [4] показали работоспособность выбранной схемы для генерации СВЧ-излучения. Однако, низкая эффективность передачи энергии в осевых генераторах заставила экспериментально изучить процессы перехвата магнитного потока сначала в простых цилиндрических системах со скользящим контактом, а затем и в конических системах, позволяющих легко регулировать начальную индуктивность ВМГ и его время работы за счет изменения угла конуса. Проведенные исследования показали высокую эффективность работы таких генераторов и их перспективность.

### 6.1. ВМГ с осевым инициированием

Конструкция ВМГ с осевым инициированием представляет собой (рис.6.1.1) коаксиально расположенные лайнер 1, внутренний соленоид 2 и внешний соленоид 3 длиной 200 мм. Генератор вырабатывает напряжение в нагрузке до 200 кВ, что учитывается при его изготовлении. Так, для предотвращения межвитковых пробоев и пробоя лайнер-спираль, внутренний соленоид наматывается медной шинкой со стекловолоконной изоляцией по спиральным канавкам на фторопластовой трубе 4 толщиной  $\Delta \approx 3$  мм, и заливается эпоксидным компаундом. Затем наматывается несколько витков полиимидной пленки 5 общей толщиной  $\approx 2$  мм. Ширина пленки превосходит на 300 мм длину

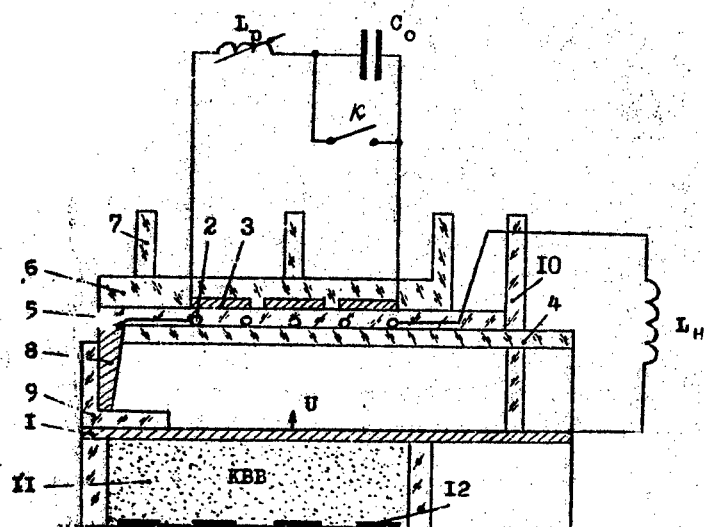
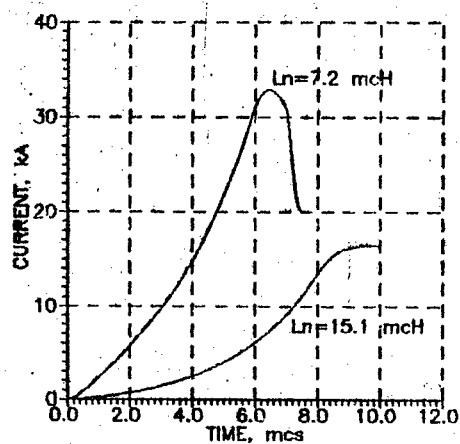


Рис.6.1.1. Схема осевого ЭМГ с "перехватом" потока.

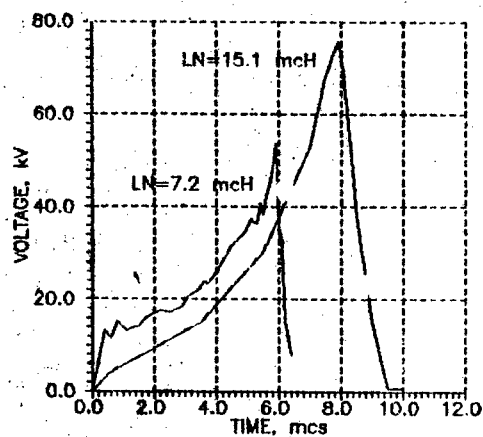
соленоидов, обеспечивая отсутствие пробоя по поверхности. Внешний соленоид закрепляется с помощью нескольких слоев стеклоткани 6, пропитанной эпоксидным компаундом. На корпус генератора, во избежание пробоев по поверхности, наклеиваются специальные ребра 7. Лайнер изготавливается из медной трубы  $D=70$  мм и толщиной стенки  $\sim 2,5$  мм. Труба протягивалась на оправке по внутренней поверхности, а по внешней — шлифовалась. Лайнер центрируется по оси симметрии генератора с помощью конического медного кольца-замкателья 8 со фторопластовой вставкой 9 и кольца 10 из оргстекла. Иницирование КВВ 11 (насыпной гексоген) производится от взрывающихся медных проволочек 12, которые располагаются по продольной оси лайнера. Сечение и длина проволочек рассчитаны для запитки от высоковольтного устройства ВУ-19 ( $C=0.1$  мкФ,  $U=50$  кВ). Такой способ иницирования был экспериментально отработан в работе [11]. Нагрузка размещается вне взрывной камеры и подсоединяется к фланцам 13 взрывомagnetного генератора с помощью четырех коаксиальных кабелей 14 типа РК-50-11-13. Генераторы перед каждым экспериментом проверялись на электрическую прочность при постоянном напряжении до 50 кВ и импульсном до 150 кВ.

Начальный магнитный поток в генераторе создается при запитке внешнего соленоида от конденсаторной батареи или от спирального взрывомagnetного генератора. В момент максимума тока происходит подрыв КВВ. Генерируется цилиндрическая расходящаяся детонационная волна, которая вызывает осесимметричный разлет лайнера. В начале разлета лайнера фторопластовая вставка 9 разрушается, вторичная цепь внутреннего соленоида и нагрузки замыкается. Магнитное поле, созданное внешним соленоидом, "перехватывается" внутренним соленоидом. Захваченное магнитное поле сжимается лайнером, а поток перераспределяется между индуктивностями генератора и нагрузки. На нагрузке вырабатывается электрический импульс.

Результаты экспериментов помещены в таблице 6.1. Типичные осциллограммы тока и напряжения, полученные в экспериментах, приведены на рис. 6.1.2. В ходе опытов варьировались индуктивности: внешнего соленоида —  $L_1=150$  мкГн, внутреннего

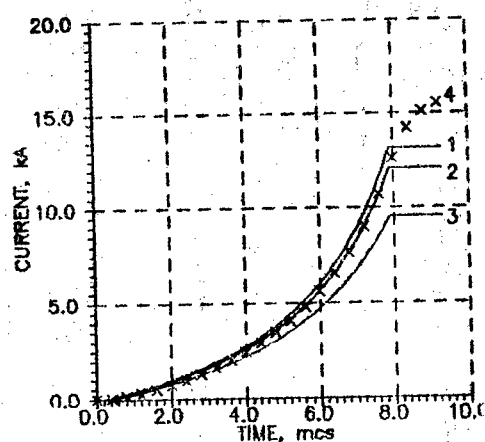


a/

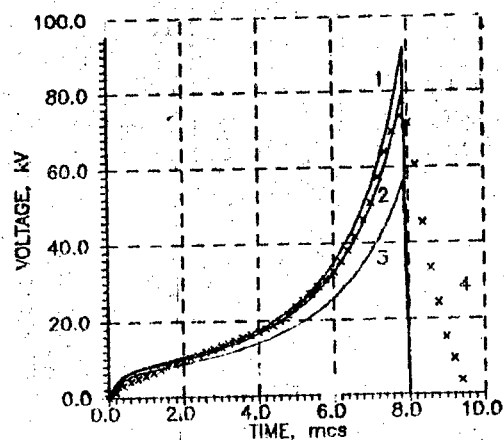


б/

Рис. 8.1.2. Типичные осциллограммы тока /а/ и напряжения /б/ в экспериментах с осевым ВМГ



a/



б/

Рис. 6.1.3. Сравнение экспериментальных данных /кривые 4/ с расчетными для тока /а/ и напряжения /б/ в нагрузке



соленоида -  $L_{20}=7+35$  мкГн, нагрузки -  $L_H=8+15$  мкГн, а также начальная энергия генератора - до 50 кДж. В индуктивной нагрузке получены токи до 30 кА, напряжения до 80 кВ при времени работы генератора 6+10 мкс.

Таблица 6.1

	1	2	3	4	5	6	7
$L_1, \mu\text{H}$	171.1	160.7	204.6	71.8	63.2	1.5	53.4
$L_2, \mu\text{H}$	27.4	35.8	27.5	21.0	21.2	13.0	12.9
$L_H, \mu\text{H}$	15.1	15.1	7.2	8.9	8.9	7.9	4.8
$I_{10}, \text{kA}$	19.6	15.4	13.6	11.1	11.0	326.1	34.3
$I_{2k}, \text{kA}$	15.0	16.4	24.7	8.3	16.6	19.9	21.3
$U_{\text{max}}, \text{kV}$	65.0	75.6	57.5	29.7	55.4	78.	70.2

На рис.6.1.3 проведено сравнение экспериментальных данных с расчетами п.3.4 при  $s=0,1,2,5$ . Видно, что наилучшее согласие получается при  $s=1$ . Отличие от работы [11], где  $s=2,5$ , можно объяснить отсутствием в рабочей цепи генератора запирающего импульса, так что омический разогрев спирали и лайнера оказывается значительно меньше, приближаясь к значениям, характерным для меди при комнатной температуре  $s=.6$ .

Проведенные эксперименты показали на малую эффективность осевых генераторов данной конструкции. Так, при энергии в первичной цепи до 50 кДж в нагрузке получено всего 2 кДж. Осевой ВМГ с перехватом потока с коэффициентом перестройки  $\lambda=5$  не является усилителем электромагнитной энергии, необходимо значительно увеличить значения  $\lambda$ .

## 6.2. Цилиндрические генераторы со скользящей точкой контакта

Как известно, наиболее высокими коэффициентами усиления энергии обладают спиральные ВМГ [5,15]. Спиральные ВМГ с "перехватом" потока использовались, в основном, в многокаскадных системах для усиления магнитного потока [18,19,25]. Расчеты п 3.6. показывают, что коэффициент усиления энергии в таких системах так же, как и в спиральных, зависит от коэффициента перестройки цепи. Однако он несколько ниже, чем в спиральных, на величину, определяемую коэффициентами связи. Для исследования процессов усиления энергии в системах с перехватом потока была предпринята специальная серия экспериментов с простыми цилиндрическими генераторами.

Цилиндрический ВМГ с перехватом потока (рис.6.2.1) состоит из соосно расположенных внешнего запиточного соленоида  $L_1$ , внутреннего соленоида  $L_2$  и медного лайнера  $L_3$  с зарядом КВВ внутри. Соленоид  $L_2$  изготавливается из медного провода марки ПЭВ-2, который укладывался равномерно в один заход на длине  $30+300$  мм в канавки, прорезанные в полиэтиленовой или фторопластовой трубе  $80+100$  мм. Толщина стенки трубы не превышала  $0,2$  мм. Сверху соленоида наносился эпоксидный компаунд и наматывался слой фторопластовой ленты, на которой закреплялся внешний соленоид. Вся сборка стягивалась затем стеклотентой, пропитанной эпоксидным компаундом. В качестве лайнера использовались медные трубы  $50$  мм и толщиной стенки  $3$  мм. Перед экспериментом измерялись индуктивности соленоидов, определялись их коэффициенты связи  $K_{1,2}$  и сравнивались с расчетными величинами. Запитка генератора осуществлялась от батареи конденсаторов на напряжение до  $10$  кВ и емкостью до  $3$  мФ. В момент достижения максимума тока инициируется заряд КВВ. Продукты детонации расширяют медный лайнер, который замыкает ключ ВК, а затем последовательно витки спирали внутреннего соленоида, вытесняя захваченный магнитный поток в нагрузку  $L_H$  и генерируя в ней ток. Индуктивности  $L_1$  и  $L_2$  образуют динамический трансформатор, во вторичной цепи которого при замыкании ключа ВК захватывается магнитный поток.



Результаты проведенных экспериментов помещены в таблице 6.2. В экспериментах варьировались индуктивности соленоидов и запиточные токи. Начальный магнитный поток  $\Phi_{10}$  составлял 0.1-0.4 Вб. В высокоиндуктивной нагрузке получены токи  $I_{2к} = 2-22$  кА, а максимальное усиление магнитного потока было  $\Phi = 6.1$ .

Таблица 6.2

	1	2	3	4	5	6	7
$L_1, \mu H$	25.0	31.0	14.0	10.9	12.3	11.2	1.64
$L_2, \mu H$	247	270	250	166	153	158,6	154
$L_H, \mu H$	50.8	42.5	42.5	44.7	53.0	48.8	44.5
$I_{10}, kA$	6.4	6.1	8.6	43.7	18.2	46.1	31.2
$I_{1к}, kA$	11.5	27.15	25.4	54.5	29.1	66.8	31.2
$I_{2к}, kA$	2.32	6.8	4.8	13.4	7.73	22.2	5.52
$K_2$	0.9	0.85	0.79	0.71	0.73	0.79	0.71
$\Phi_{расч}$	2.8	2.5	3.34	2.8	2.67	2.97	6.88
$\Phi_{экспер}$	1.26	2.14	2.88	1.54	2.26	2.63	6.1
$\eta$	0.45	0.86	0.86	0.55	0.85	0.88	0.89

На рис.6.2.2-6.2.4 приведен характерный вид токов в цепи внешнего соленоида и в цепи нагрузки, а также напряжение на нагрузке, для эксперимента №6. Ток в нагрузке быстро нарастает от нулевого значения до максимального при этом напряжение на нагрузке достигает 50 кВ. На рисунках приведены также их расчетные значения по модели п.3. Видно хорошее согласие с экспериментом.

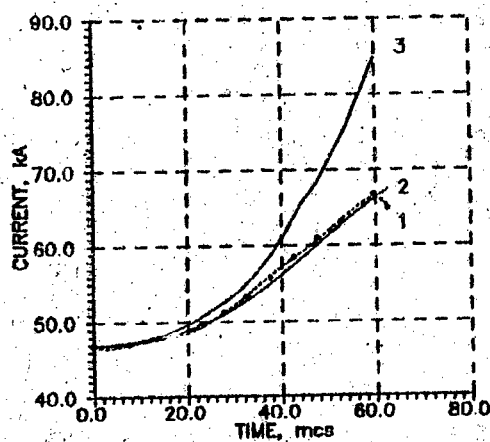


Рис. 6.2.2. Сравнение экспериментальных и расчетных величин тока в первичной цепи для цилиндрического ВМ.

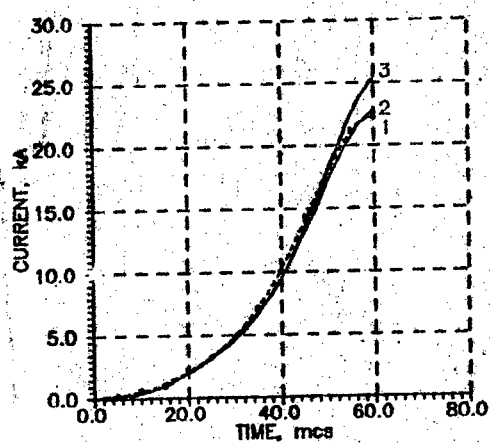


Рис. 6.2.3. Сравнение экспериментальных и расчетных величин тока во вторичной цепи для цилиндрического ВМГ

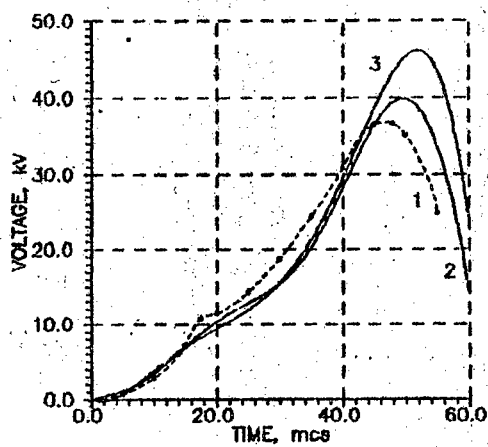


Рис. В.2.4. Сравнение экспериментальных и расчетных величин напряжения в нагрузке для цилиндрического ВМГ

### 6.3. Конические генераторы

Время работы цилиндрических генераторов с торцевым иницированием определяется длиной спирали. Если требуется время работы  $\approx 10$  мкс, и нужны соленоиды с большой индуктивностью (для получения высоких значений коэффициента усиления энергии), то возникают сложности при намотке коротких высокоиндуктивных спиралей. Так, во-первых, величина минимального шага намотки (для избежания перемыкания витков и устранения перескока скользящей точки контакта) должна быть больше характерных неоднородностей при разлете лайнера. Во-вторых, эффективное сечение провода должно обеспечивать отсутствие его омического разогрева генерируемым током. В-третьих, изоляция провода должна выдерживать межвитковое напряжение, а также напряжение, возникающее между лайнером и спиралью.

Более выгодными в этом отношении представляются конические генераторы, в которых образующие соленоидов расположены под углом к оси лайнера. В этом случае заданное время работы ВМГ при известной его длине определяет выбор соответствующих диаметров при вершине и основании конуса.

В целом конструкция конического генератора мало отличается от цилиндрического (см. рис. 6.3.1.). Так как возникающие в таком генераторе напряжения выше, для провода использовалась фторопластовая изоляция толщиной 0,2 мм, которая увеличивалась до 0,5 мм в конце генератора. Для обеспечения более малых времен работы генератора был убран также специальный замыкатель, так что вторичная цепь начинала работать при непосредственном достижении лайнером спирали. Длина соленоида составляла 80+100 мм, больший диаметр конуса -  $\varnothing_1=104$  мм, меньший менялся в диапазоне  $D=60+90$  мм.

Результаты экспериментов приведены в таблице 6.3. Отладка ВМГ осуществлялась на нагрузку  $I_H=4.75$  мкА. В ходе опытов менялись диаметры, длины и углы конусов токонесящих катушек, их индуктивности, межвитковая изоляция,



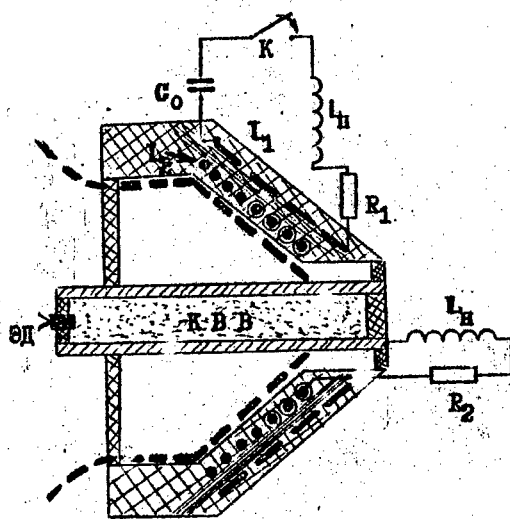


Рис. 6.3.1. Схема конического ВМТ с "переводчиком" потока.

вспыточный ток. В нагрузке получены токи до 35 кА при энергии ~3 кДж, коэффициент усиления энергии ~1.3. Время работы ВМГ изменялось в диапазоне от 6 до 11 мкс.

Таблица 6.3

№	L2, мГн индуктивность ВМГ	EO, кДж начальная энергия	I <sub>max</sub> , кА ток в нагрузке	E <sub>max</sub> , кДж энергия	t, мкс время работы
1.	26.6	1.3	9.5	0.21	5.4
2.	52.0	2.5	18.1	0.78	9.0
3.	52.1	0.7	6.9	0.11	7.2
4.	32.0	2.6	8.2	0.16	10.9
5.	43.2	2.4	21.8	1.13	6.5
6.	49.7	4.2	19.2	0.88	9.8
7.	68.0	2.2	32.9	2.57	7.3
8.	68.0	2.4	35.0	2.90	9.2
9.	77.2	1.7	14.2	0.48	7.3
10.	222.6	0.9	17.9	0.76	11.3
11.	64.7	2.5	29.2	2.03	7.1

Типичный ход экспериментальных кривых тока и его производной во внешнем соленоиде, тока и напряжения в нагрузке приведен на рис. 6.3.2-6.3.5. Там же приведены расчетные кривые по модели п.3.7. Видно их удовлетворительное согласие, что позволило использовать эти модели для выборов параметров ВМГ в экспериментах с ЭВП и виркатором.

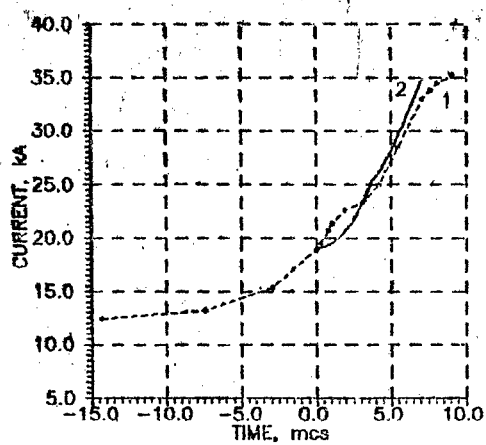


Рис. 6.3.2. Расчётная и экспериментальная зависимости тока в первичной цепи для конического ВМГ

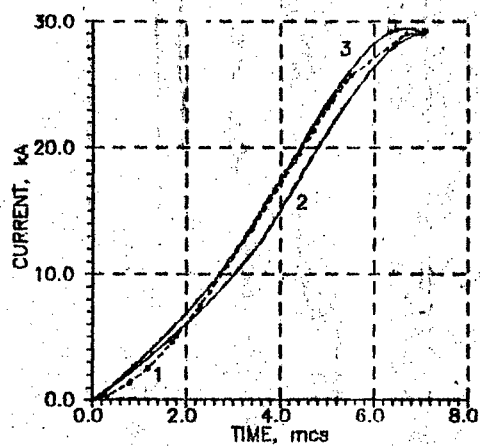


Рис 6.3.3. Расчетные и экспериментальная зависимости тока во вторичной цепи для конического ВМГ

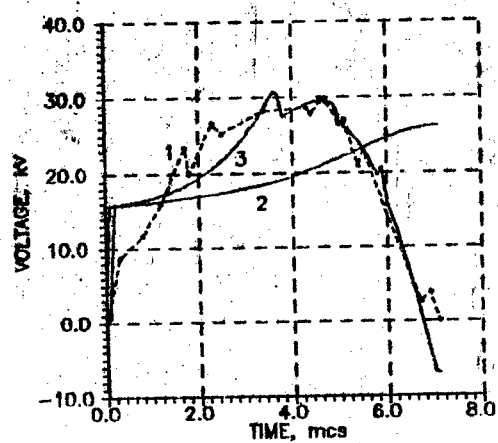


Рис. 6.8.4. Расчетные и экспериментальная зависимости напряжения в нагрузке для конического ВМГ

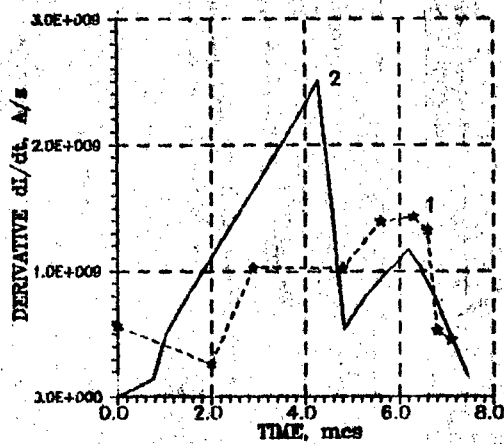


Рис. 6.3.5. Расчетная и экспериментальная зависимости производной тока в первичной цепи конического ВМГ

## VII. Экспериментальное исследование режимов генерации мощного СВЧ-излучения

Были проведены экспериментальные исследования работоспособности предложенной схемы, ее возможности по формированию импульсов напряжения с требуемыми характеристиками фронта, длительности, а также по генерации СВЧ-излучения. В ходе экспериментов оптимизировались параметры ЭВП, накопительной индуктивности, катода, величины промежутка катод-анод и другие параметры.

Для более полного понимания условий генерации СВЧ-колебаний в триоде были экспериментально изучены, а затем проанализированы схемы:

1. ГИИ, разделительный разрядник, триод;
2. ГИИ, накопительная индуктивность, ЭВП, разрядник, триод;
3. ГИИ, накопительная индуктивность, ЭВП, обостряющая емкость, разрядник, триод;
4. БМГ, накопительная индуктивность, ЭВП, разрядник, триод.

### 7.1. Схема 1. ГИИ - разделительный разрядник - триод

Эксперименты по этой схеме проводились при напряжении на ГИИ  $U_{\text{ГИИ}} = 350$  кВ, пробивное напряжение в разряднике  $U_{\text{п}} = 100$  кВ. На рис. 7.1.1 представлены осциллограммы импульсов напряжения в катод-анодном промежутке триода, импульс тока в цепи ГИИ-анод-катод, импульс СВЧ излучения. При напряжении в триоде  $U = 168$  кВ была получена мощность излучения на уровне 10 МВт.

Процесс генерации начинается при пусковом токе на уровне 7 кА через 220-240 нс после подачи напряжения на катод-анодный промежуток. За такой промежуток времени происходит заполнение плазмой катод-анодного промежутка. Малый уровень мощности в данном эксперименте объясняется низким уровнем

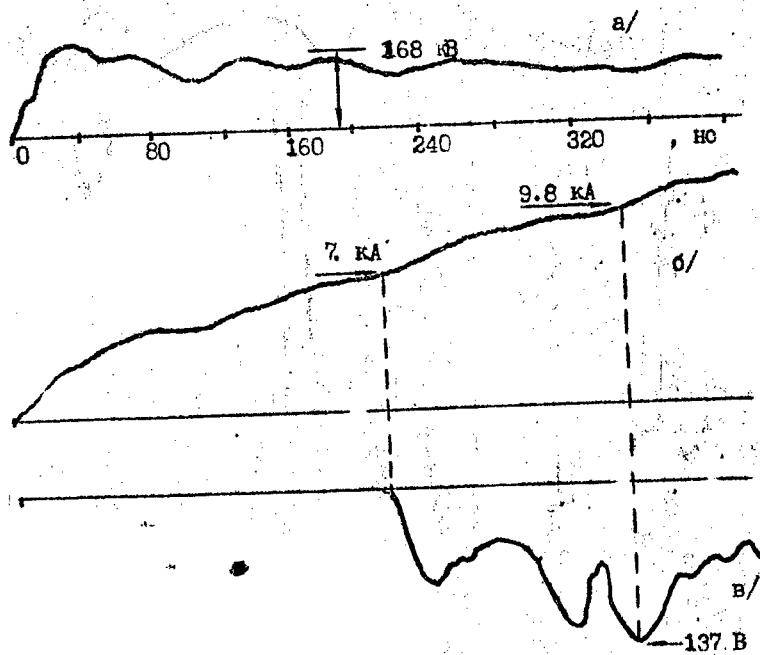


Рис. 7.1.1. Осциллограммы импульсов  
напряжения /а/, тока /б/,  
мощности СВЧ-излучения /в/.



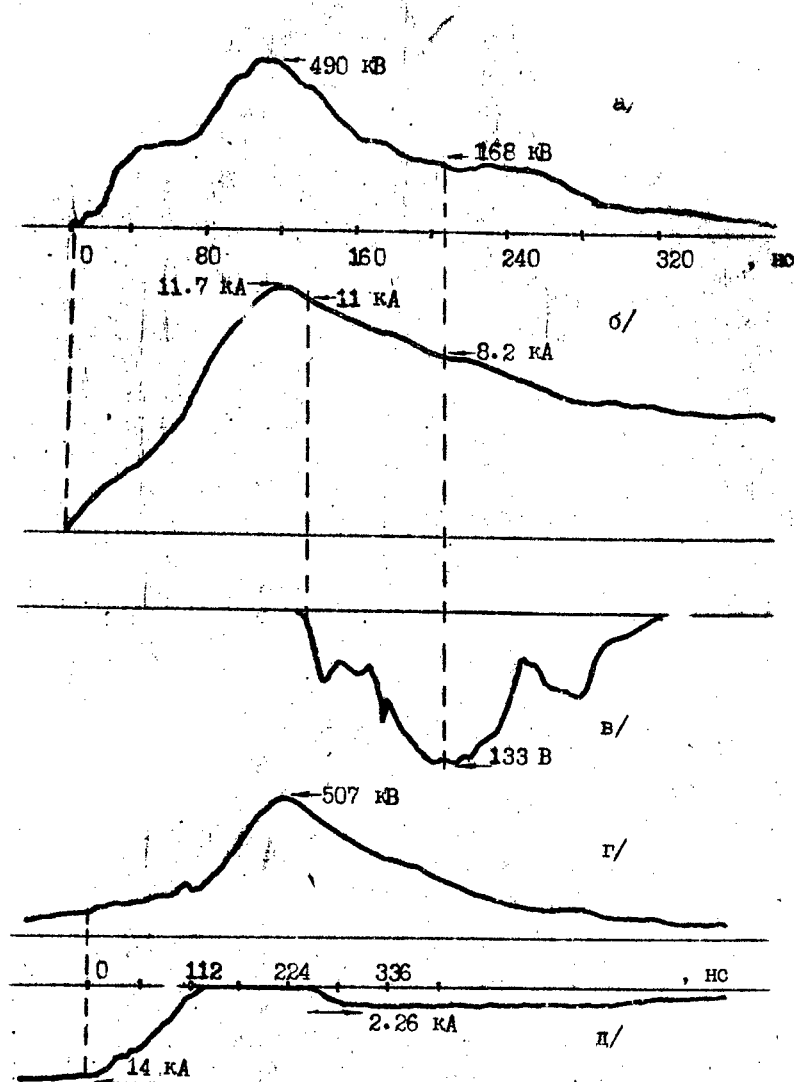


Рис. 7.2.1. Осциллограммы импульсов напряжения /а/, тока /б/, мощности СВЧ-излучения /в/, а также напряжения ЭВН /г/, тока ЭВН /д/.

напряжения, заполнением плазмой промежутка в момент генерации СВЧ излучения.

### 7.2. С х е м а 2. ГИИ - накопительная индуктивность - ЭИИ - разделительный разрядник - триод

Эксперименты проводились при напряжении ГИИ  $U_{\text{ГИИ}} = 350$  кВ, пробивное напряжение в разряднике  $U_{\text{П}} = 100$  кВ, величина накопительной индуктивности  $L_{\text{Н}} = 2+12$  мкГн, диаметр проволоки ЭИИ 0.05 мм, длина проводника 550, число проводников 30. На рис. 7.2.1 представлены осциллограммы регистрируемых импульсов. Из осциллограмм видно, что при одном и том же напряжении на выходе ГИИ  $-U_{\text{ГИИ}}$  за счет накопительной индуктивности и ЭИИ напряжение на катод-анодном промежутке увеличивалось в 3 раза. Фронт импульса напряжения составлял 60 нс. Амплитуда тока достигала 11,7 кА. Однако мощность генерации в этом случае не превышала 100 МВт. Генерация начинается в момент времени, когда ток достигает максимального значения (11,7 кА), что значительно превышает значение пускового тока (7 кА), и протекает на спаде импульсов напряжения и тока.

### 7.3. С х е м а 3. ГИИ - накопительная индуктивность - ЭИИ - обостряющая емкость - разделительный разрядник - триод

Эксперименты проводились при напряжении ГИИ  $U_{\text{ГИИ}} = 380$  кВ, пробивное напряжение на разряднике  $U_{\text{П}} = 370$  кВ, величина накопительной индуктивности  $L = 8$  мкГн, диаметр проволоки ЭИИ 0.05 мм, длина проводника 550, число проводников 30. На рис. 7.3.1 представлены осциллограммы регистрируемых импульсов. Видно, что за счет обостряющей емкости появляется пик напряжения  $\sim 750$  кВ с фронтом нарастания  $\sim 20$  нс. Амплитуда тока достигает 11 кА. Однако мощность генерации СВЧ излучения и момент ее появления существенно не изменяются.

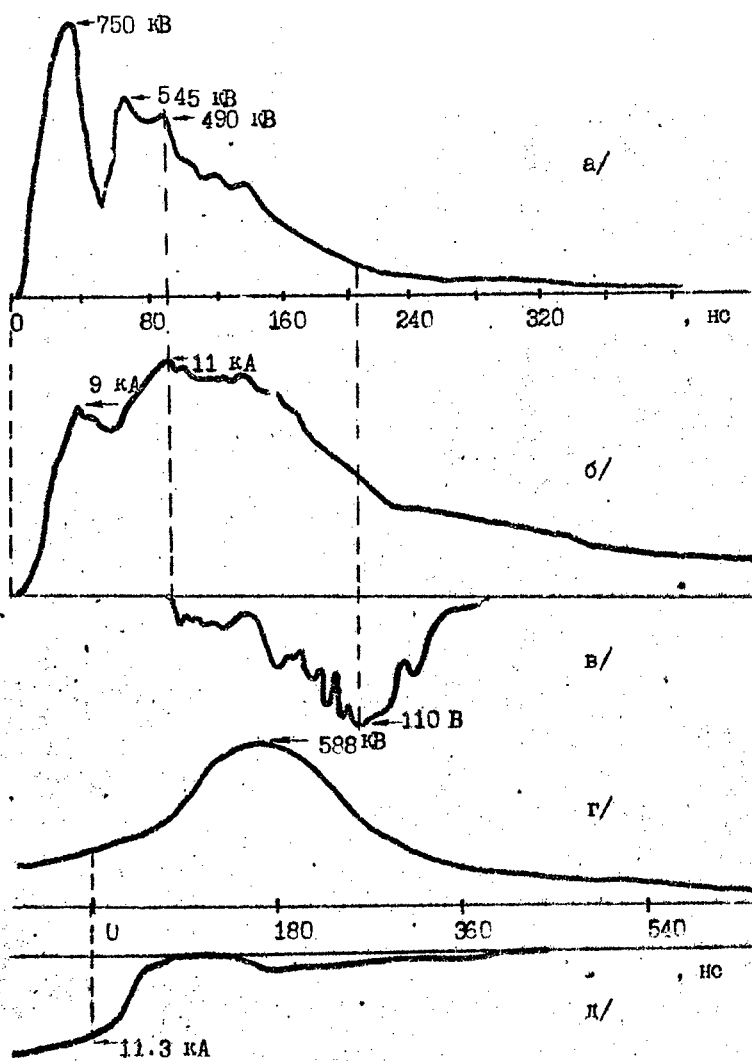


Рис. 7.3.1. Осциллограммы импульсов напряжения /а/, тока /б/, мощности СВЧ-излучения /в/, а также напряжения ЭВН /г/ и тока ЭВН /д/.

#### 7.4. С х е м а 4. ВМГ - накопительная индуктивность - ЭВП - разделительный разрядник - триод

Эксперименты проводились на разработанных нами спиральных ВМГ с перехватом потока двух типов: с осевым ивчированием и со скользящим контактом. Параметры экспериментов даны в таблице 7.1. Эксперименты с индексом 0 относятся к осевым генераторам, С-цилиндрическим, и D-коническим. В эксперименте DII, использовались два конических ВМГ, соединенных последовательно. В экспериментах с осевыми генераторами, обозначенными звездочкой, для запитки использовались спиральные генераторы с энергией  $\sim 60$  кДж. В ходе экспериментов изменялись также энергия запитки ВМГ, величина накопительной индуктивности и параметры ЭВП. На рис. 7.4.1 - 7.4.2 представлены осциллограммы зарегистрированных импульсов на триоде и ЭВП в экспериментах 018 и D8. В опыте D8 был сформирован импульс напряжения амплитудой 600 кВ с фронтом нарастания  $\sim 60$  нс, при этом амплитуда тока в вириаторе достигала 15.5 кА, а мощность электронного пучка -  $\sim 10$  ГВт. Однако, как и в схемах 2-3, наблюдалось запаздывание начала генерации. Генерация происходила на спаде импульсов напряжения и тока, а ее начало соответствует току, превышающему пусковое значение. Полученная пиковая мощность излучения составила не менее 100 МВт.

Таблица 7.1

МН	ЕО, кДж	I <sub>max</sub> , кА	Ен, кДж	ЭВП	U, кВ	I, кА	N, с.е.
	начальная	ток	энергия	L(мм)-	напр.	ток	мощность
	энергия	БМГ	в инд.	-N на триоде	триода	триода	излучения

L <sub>H</sub> =8.9 мкГн							
04.	28.8	16.2	1.2	540-28	205	3.8	9
05.	32.0	18.0	1.4	470-32	325	7.4	50
06.	54.0	13.1	0.8	780-46	130	1.5	-
07.	37.0	13.2	0.8	700-40	155	1.7	-
08.	27.0	16.4	1.2	540-52	175	1.8	-
09.	28.0	16.4	1.2	470-32	270	4.3	10
010.	27.3	15.2	1.0	540-32	255	5.4	13
011.	27.0	16.6	1.2	470-27	320	6.7	23
012.	27.2	14.8	1.0	540-28	210	3.2	1

L <sub>H</sub> =7.9 мкГн							
018 <sup>+</sup>	53.1	19.9	1.6	620-42	450	11.6	130
019 <sup>+</sup>	63.0	21.1	1.8	870-54	170	4.2	10
020 <sup>+</sup>	60.2	23.6	2.2	780-50	250	5.8	30
011.	3.0	24.0	2.2	680-50	450	10.9	150

L <sub>H</sub> =4.8 мкГн							
022.	16.9	20.7	1.0	720-44	130	3.0	-
023.	22.0	23.0	1.3	720-44	270	7.5	115
024.	31.0	22.4	1.2	720-48	130	2.0	-
025.	29.5	21.4	1.1	620-44	140	3.0	-
02.	5.0	15.4	0.6	650-44	200	6.5	1
D1	2.3	22.7	1.2	620-42	200	6.0	1
D2	3.0	19.1	0.8	550-38	280	3.3	-
D5	2.5	25.7	1.6	475-42	420	8.0	22
D6	2.6	26.6	1.7	475-46	430	8.5	2
D7	3.0	21.7	1.1	720-37	390	9.5	132
D8	3.4	30.0	2.2	680-50	600	15.5	190

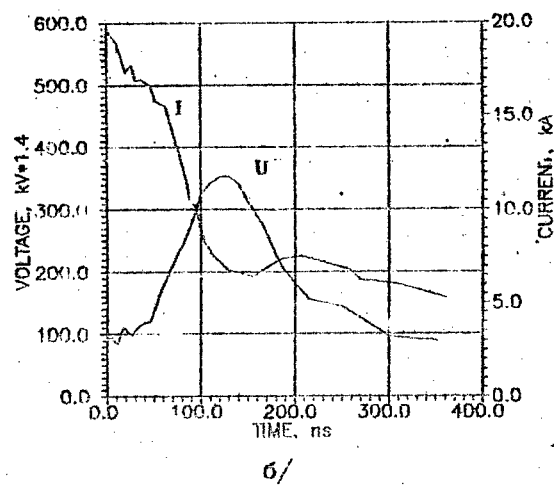
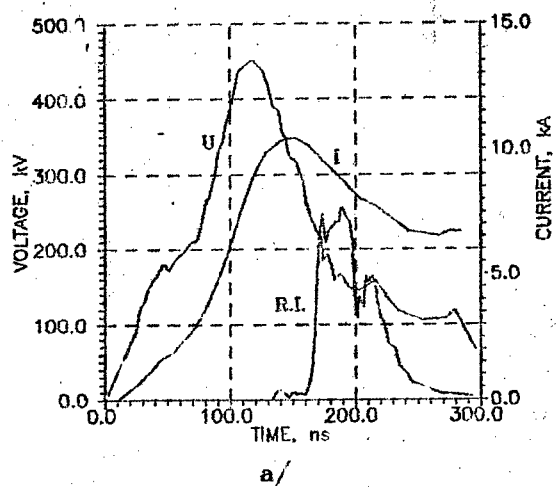


Рис. 7.4.1. Осциллограммы импульсов  
в диоде /а/ и на э.в.л. /б/  
в эксперименте с осевым ВЧП

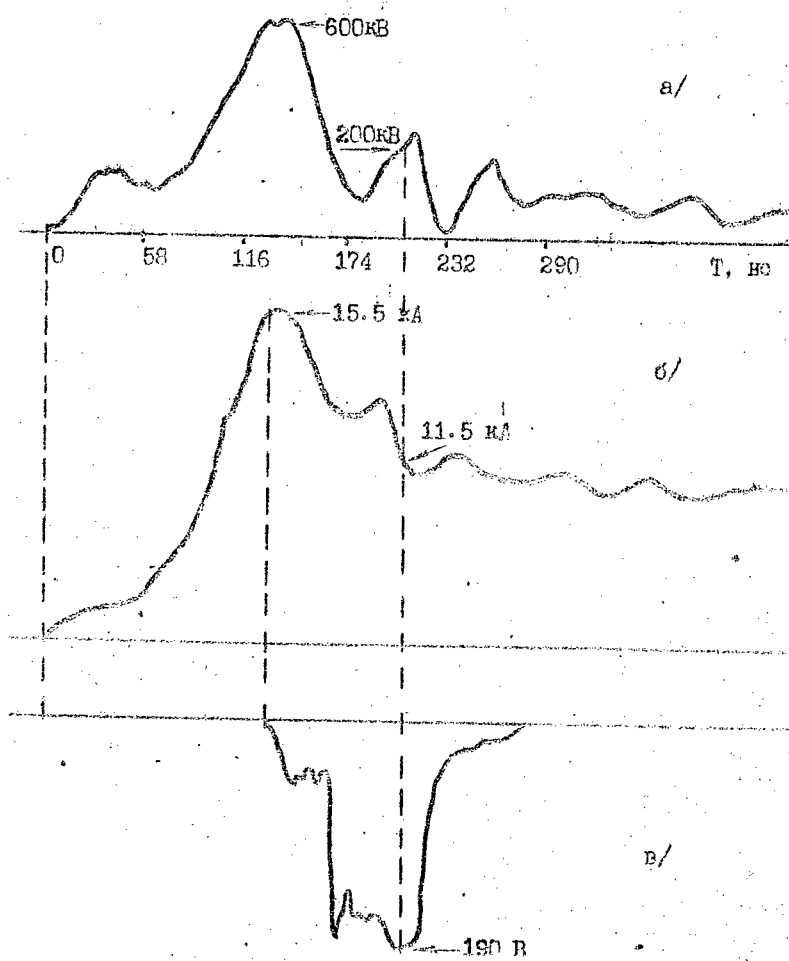


Рис 7.4.2. Осциллограммы импульсов напряжения /а/,  
тока /б/, мощности СВЧ-излучения /в/  
в эксперименте с коническим ВМТ.

#### VIII. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ.

На основе экспериментального исследования ВМГ с "перехватом" потока на индуктивную нагрузку разработаны модели ВМГ и ЭВП для расчета электрической схемы запитки вириатора. Анализ электрической цепи позволил сформулировать требования к импульсам, вырабатываемым ВМГ, и на основании этих требований созданы конкретные компактные устройства для безтрансформаторной схемы.

Проведенные эксперименты показали работоспособность предложенной нами безтрансформаторной схемы запитки излучателя - вириатора от взрывомagnetных генераторов. К вириатору подводили импульсы напряжения до 600 кВ с фронтом нарастания 60 нс при токе до 10 кА. Пиковая мощность выведенного в атмосферу СВЧ-излучения составила ~100 МВт при мощности в электронном пучке до 10 ГВт.

В ходе экспериментов обнаружено значительное отличие процесса генерации СВЧ-излучения по сравнению с наблюдаемым в традиционных схемах, когда в триоде в качестве источника напряжения используются высоковольтные ускорители прямого действия. В качестве накопителя энергии в таких источниках напряжения применяются ГИИ по схеме Аркадьева Маркса, а импульс напряжения формируется с помощью двойных формирующих линий и газовых коммутаторов. В экспериментах на высоковольтных ускорителях генерация начинается при пусковых токах не более 10 кА, как правило, на переднем фронте импульса напряжения (и импульса тока), а прекращается на спаде импульса напряжения. При длительностях  $\tau_d = 80-2100$  нс импульс напряжения генерация прекращается в конце импульса напряжения, и длительность импульса СВЧ сравнима с длительностью импульса напряжения. В этих экспериментах за время генерации СВЧ излучения катод-анодный промежуток не заполняется катодной и анодной плазмой. С момента генерации и до конца процесса генерации катод-анодный промежуток работает в режиме ограничения пространственного заряда. При этом создаются стабильные условия формирования виртуального катода, фазовой группировки и селекции частиц в триоде, что позволяет гене-



рировать в триоде СВЧ-излучение с высокой эффективностью (к.п.д. 10-30%).

В экспериментах по схеме 1 генерация начиналась при пусковом токе 7 кА и протекала обычным образом. Катод-анодный промежуток работал в режиме ограничения пространственного заряда. Об этом свидетельствует график зависимости изменения эффективного зазора катод-анодного промежутка за время действия импульса напряжения (рис. 8.1, кривая 1). Из графика видно, что в случае работы триода от ГИНа, со временем происходит уменьшение эффективного зазора катод-анодного промежутка, что характерно для взрывоэмиссионных диодов, работающих в режиме ограничения пространственного заряда. Уменьшение зазора за время действия импульса напряжения объясняется перекрытием катод-анодной плазмой промежутка катод - анод. Так как достижение пускового значения тока происходит через 220-240 нс после подачи напряжения на промежуток катод-анод, то за это время плазма успевает заполнить промежуток. Это приводит к нарушению стационарного состояния системы с виртуальным катодом и к снижению эффективности генерации.

В экспериментах по схемам 2-4 процесс генерации начинался при токах значительно больше пусковых и протекал на спаде импульсов напряжения и тока. Генерация на спаде импульса напряжения происходит в условиях нарушения стабильного состояния формирования виртуального катода, группировки и селекции частиц в генераторе, приводит к нарушению стабильности частоты СВЧ излучения. Все это резко снижает эффективность генерации. Поэтому уровень мощности генерируемых колебаний при полученных параметрах импульса напряжения и тока был сравнительно невысок. Запоздленное начало процесса генерации и его начало при токах, значительно превышающих пусковые для данного виркатора, очевидно, связано с тем, что до момента генерации в катод-анодном промежутке были нарушены условия работы промежутка в режиме ограничения пространственного заряда. Об этом свидетельствуют полученные зависимости изменения эффективного зазора катод-анодного промежутка за время действия импульса напряжения (рис. 8.1, кривые 2,3). Наличие возрастающего участка на кривых в интервале времени 60-100

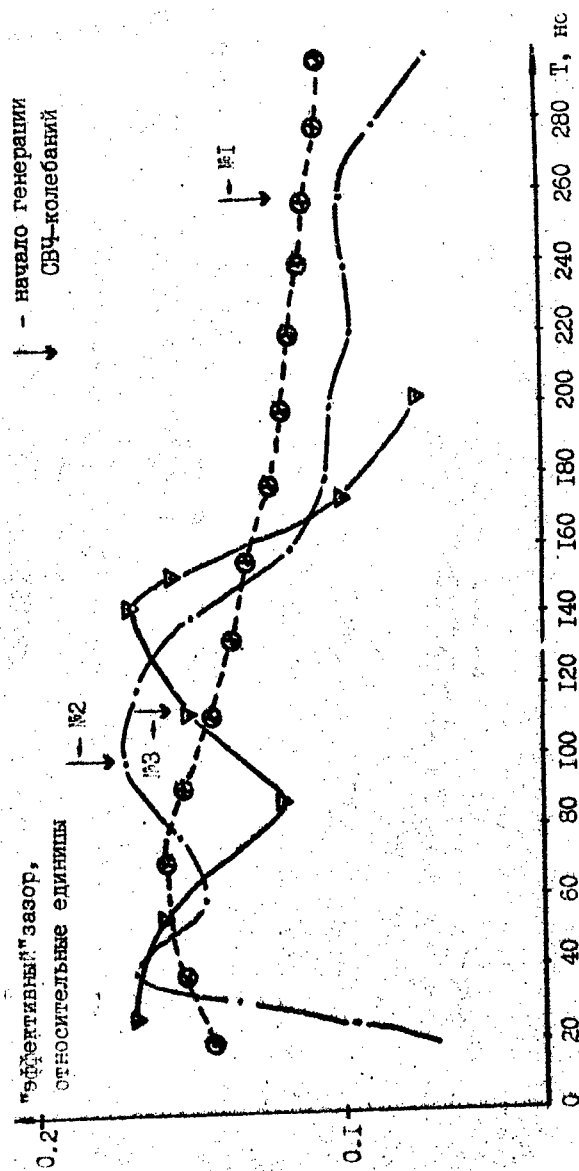


Рис. 8.1. Изменение "эффективного" зазора между катодом и анодом в триоде: №1-схема I, №2-схема II, №3-схема III.

нс (кривая 2) и 90-150 нс (кривая 3) говорит об увеличении эффективного зазора, что противоречит физическим представлениям работы взрывоэмиссионных триодов.

Для повышения коэффициентов преобразования и передачи энергии в рассмотренной схеме требуются дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Диденко А.Н., Арзин А.П., Жермицын А.Г. и др. - В сб.: Релятивистская высокочастотная электроника, Горький, ИФЭ АН СССР, 1984, вып.4, с.104-118.
2. Бугаев С.П., Кичаев В.Н., Кляков А.Н. и др. - Радиотехника и электроника, 1987, т.32, N 7, с. 1488-1498.
3. Burkhart S. - J.Appl. Phys., 1987, vol.62, N 1, p 75-78.
4. Азаревич Е.И., Диденко А.Н., Долгополов П.В. и др. - ДАН СССР, 1991, т.319, N2, с.352-355.
5. Бродский А.Я., Вдовин В.А., Корженевский А.В. и др. - ДАН СССР, 1990, т.314, N 4, с.846-849.
6. Саторов А.Д., Людаев Р.З., Смирнов Е.Н. и др. - ДАН СССР, 1965, т.165, N 1, с.65-68.
7. Павловский А.И., Людаев Р.З. В сб. Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики, - Москва: Наука, 1984, с.206.
8. Мещяк Г.А., Исаков С.А., Комяк Н.И., Пеликс В.А. Мощные наносекундные импульсы рентгеновского излучения, - Москва: Энергоатомиздат, 1983.
9. Bromborsky A., Kels R.A., Nuttlin G.A. et al. IEEE International Conference in Plasma Science, Abstracts, Arlington, 1987, p. 39.
10. Диденко А.Н., Жермицын А.Г., Сулашвили А.С. и др. - Письма в ЖТФ, 1983, т.9, вып.24, с.1510-1513.
11. Жермицын А.Г., Исаков В.П., Лопатин Н.В. и др. - ТВТ, 1990, т.28, N 5, с.988-998. Исследование работы спиральных взрывомагнитных генераторов с осевым инициированием А.А.Великий, П.В.Долгополов, А.Г.Жермицын и др. - АН СССР, Ин-т хим.физ. Препринт-Черноголовка, 1989, -44 стр.
12. Zherlitsyn A.G., Isakov V.P., Lopatin N.V. et al. In book: Megagauss Fields and Pulsed Power Systems. New York, Nova Science Publishers, 1990, p.607-613.

13. Расчетная модель электровзрывного прерывателя тока *Б.И.Азаревич, А.В.Коблучко, О.А.Котов, Т.А.Лисецкая* Высоковольтные искровые и взрывные коммутаторы Тез. докл. совместного заседания секции науч.советов АН СССР "Научные основы электрофизики и электротехники" и "Проблемы мощной импульсной энергетики" Томск, 27-28 ноября 1986 г.-Томск, 1986.- с.109-III.
14. Бурцев В.А., Калинин И.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках.-М.: Энергоатомиздат, 1990.-288 с.
15. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля,- Москва: Мир, 1972.
16. Fowler C.M., Peterson D.R., Kerrick J.F., et.al. В кн.: Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение. Под ред. Титова В.М. и Швецова Г.А. М.: Наука, 1984, с.282.
17. Jones C.R., Fowler C.M., Ware F.D. In book: Megagauss Technology and Pulsed Power Application. New York and London, Plenum Press, 1987, p.747.
18. Давыдов В.А., Чернышев В.К. - ПМТФ, 1981, N 6, с.112-117.
19. Павловский А.И., Любав Р.З., Дряев А.С. и др. В кн.: Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение. Под ред. Титова В.М. и Швецова Г.А. М.: Наука, 1984, с.312.
20. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей:Справочная книга.- Л.: Энергоатомиздат, 1986.
21. Chernyshev V.K., Zhurinov E.I., Kazakov S.A., et.al. In book: Megagauss Technology and Pulsed Power Application. New York and London, Plenum Press, 1987, p.455.
22. Пробивные напряжения электровзрывных прерывателей тока *Б.И.Азаревич, О.А.Котов, М.А.Миронова, Д.Н.Сосухин*/ Тез.- докл.совместного заседания секции науч.советов АН СССР "Научные основы электрофизики и электротехники" и "Проблемы мощной импульсной энергетики" Томск, 27-28 ноября 1986 г.- Томск, 1986.- с.106-107.
23. Арушян О.В., Залеткин С.Ф. Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений на Фортране.- Из-во МГУ, 1990.-336 с.

24. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975, 735 с.
25. Швецов Г. А., Матросов А. Д. В кн.: Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение. Под ред. Титова В. М. и Швецова Г. А. М.: Наука, 1984, с. 263.

# REPORT DOCUMENTATION PAGE

Form Approved OMB No. 0704-0188

Public reporting burden for this collection of information is estimated to average 1 hour per response, including the time for reviewing instructions, searching existing data sources, gathering and maintaining the data needed, and completing and reviewing the collection of information. Send comments regarding this burden estimate or any other aspect of this collection of information, including suggestions for reducing this burden to Washington Headquarters Services, Directorate for Information Operations and Reports, 1215 Jefferson Davis Highway, Suite 1204, Arlington, VA 22202-4302, and to the Office of Management and Budget, Paperwork Reduction Project (0704-0188), Washington, DC 20503.

1. AGENCY USE ONLY (Leave blank)		2. REPORT DATE 1995	3. REPORT TYPE AND DATES COVERED Final report/Interim Report	
4. TITLE AND SUBTITLE  Generation of High Power Microwave Radiation with the Aid of High Explosive. Russian			5. FUNDING NUMBERS  F6170894W0777	
6. AUTHOR(S)  V. Mintsev				
7. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES)  Institute of Problems of Chemical Physics Moscow Region Chernogolovka 142432 Russia			N/A	
9. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES)  EOARD PSC 802 Box 14 FPO 09499-0200			10. SPONSORING/MONITORING AGENCY REPORT NUMBER  SPC 94-4101	
11. SUPPLEMENTARY NOTES  Includes the interim report "Magnetic Flux Compressors with Flux Trapping" in English.				
12a. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT  Approved for public release; distribution is unlimited.			12b. DISTRIBUTION CODE  A	
ABSTRACT (Maximum 200 words)  The present paper looks into the Magnetic Flux Compressors (MFC) from the point of view of their integration with high power microwave sources. First of all the typical constructions and principals of there operations will be considered. After that the possibilities of production of video impulse will be discussed and MFC as a pulsed power system for feeding relativistic microwave generators will be described.				
14. SUBJECT TERMS  EOARD, Russian, magnetic, flux, compressors, microwave			15. NUMBER OF PAGES  93 and 39	
			16. PRICE CODE N/A	
17. SECURITY CLASSIFICATION OF REPORT  UNCLASSIFIED	18. SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE  UNCLASSIFIED	19. SECURITY CLASSIFICATION OF ABSTRACT  UNCLASSIFIED	20. LIMITATION OF ABSTRACT  UL	

NSN 7540-01-280-5500

Standard Form 298 (Rev. 2-89)  
Prescribed by ANSI Std. Z39-18  
298-102